



**Dynamique fluviale de la Garonne à l'anthropocène :
trajectoire d'évolution du tronçon fluvial compris entre
les confluences de l'Ariège et du Tarn (Garonne
toulousaine, 90 km)**

Mélodie David

► **To cite this version:**

Mélodie David. Dynamique fluviale de la Garonne à l'anthropocène : trajectoire d'évolution du tronçon fluvial compris entre les confluences de l'Ariège et du Tarn (Garonne toulousaine, 90 km). Géographie. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 2016. Français. NNT : 2016TOU20034 . tel-01358114

HAL Id: tel-01358114

<https://theses.hal.science/tel-01358114>

Submitted on 31 Aug 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse - Jean Jaurès

Présentée et soutenue par :

Mélodie DAVID

le lundi 20 juin 2016

Titre :

Dynamique fluviale de la Garonne à l'Anthropocène
Trajectoire d'évolution du tronçon fluvial compris entre les confluences de
l'Ariège et du Tarn (Garonne toulousaine, 90 km)

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED TESC : Géographie et aménagement

Unité de recherche :

GEODE - UMR 5602, CNRS/UT2J

Directeur/trice(s) de Thèse :

Jean-Michel Carozza, Professeur, Université de La Rochelle

Jury :

Gilles Arnaud-Fassetta, Professeur, Université Paris 7 Diderot (Rapporteur)
Nathalie Carcaud, Professeur, AgroCampus Ouest, Angers (Rapporteur)
Alfredo Ollero, Professeur, Université de Saragosse, Espagne (Examineur)
Hervé Piégay, Directeur de recherche CNRS, UMR 5600, Lyon (Examineur)
Jean-Luc Probst, Directeur de recherche CNRS, UMR 5245, Toulouse (Examineur)
Philippe Valette, Maître de conférence, Université Toulouse Jean-Jaurès (Co-directeur)

Sommaire

| | |
|---------------------------|----------|
| Sommaire..... | 1 |
| Acronymes..... | 3 |
| Remerciements..... | 5 |
| Introduction..... | 9 |

Partie 1 6 Présentation de l'étude : cadre thématique, cadre physique, problématique et stratégie du projet de thèse.....13

| | |
|---|-----------|
| <i>Chapitre 1. - Cadre thématique : le changement fluvial de l'Anthropocène, un enjeu socio-environnemental.....</i> | <i>15</i> |
| 1.1. Le cours d'eau en tant que système environnemental complexe | 15 |
| 1.2. L'enjeu socio-environnemental du fonctionnement hydro-sédimentaire des cours d'eau..... | 17 |
| 1.3. Le changement fluvial de l'Anthropocène et l'altération des milieux | 23 |
| 1.4. La réponse des sociétés au changement : l'ère de la restauration | 30 |
| 1.5. Conclusion du chapitre 1 | 34 |
| <i>Chapitre 2. - Cadre physique : conditions limites et dynamique fluviale de la Garonne toulousaine.....</i> | <i>35</i> |
| 2.1. Organisation morphostructurale, hydrographique, hydrologique et hydro-morphologique du bassin versant de la Garonne..... | 36 |
| 2.2. Fonctionnement hydro-sédimentaire de la Garonne toulousaine | 39 |
| 2.3. Conclusion du chapitre 2 | 51 |
| <i>Chapitre 3. - Projet de thèse : enjeux de recherche, objectif ciblé et démarche méthodologique mise en oeuvre</i> | <i>53</i> |
| 3.1. Synthèse des travaux antérieurs | 53 |
| 3.2. Enjeux de recherche sur la trajectoire historique de la dynamique fluviale de la Garonne toulousaine | 55 |
| 3.3. Objectif de recherche..... | 61 |
| 3.4. Démarche méthodologique | 61 |
| 3.5. Conclusion du chapitre 3 | 64 |
| Conclusion de la Partie 1..... | 65 |

Partie 2 6 Évolution en plan du linéaire fluvial de la Garonne toulousaine au cours de la période 1750-2000 : analyse des documents cartographiques historiques.....67

| | |
|--|-----------|
| <i>Chapitre 4. - Démarche méthodologique mise en oeuvre pour l'analyse des documents cartographiques historiques</i> | <i>69</i> |
| 4.1. Inventaire des données géohistoriques | 70 |
| 4.2. Intégration des données géohistoriques dans un système d'information géographique (SIG).... | 83 |
| 4.3. Segmentation de la basse plaine..... | 85 |
| 4.4. Mise en %uvre d'une base de données géomorphométrique..... | 87 |
| 4.5. Traitements statistiques | 89 |
| 4.6. Spatialisation de la typologie dynamique des formes fluviales et analyse qualitative des ajustements fluviaux..... | 90 |
| 4.7. Limites de l'approche géohistorique | 91 |
| 4.8. Conclusion du chapitre 4 | 93 |
| <i>Chapitre 5. - Evolution des formes fluviales au cours de la période 1868-2000 : quantification, typologie dynamique et inscription sur le long terme.....</i> | <i>95</i> |
| 5.1. Evolution globale des formes fluviales au cours de la période 1868-2000 : approche quantitative univariée..... | 95 |
| 5.2. Typologie dynamique des formes fluviales au cours de la période 1868-2000 : approche quantitative multivariée..... | 97 |
| 5.3. Evolution du fonctionnement hydro-sédimentaire au cours de la période 1750-2000 : approche qualitative | 102 |
| 5.4. Conclusion du chapitre 5 | 109 |

| | |
|---|------------|
| <i>Chapitre 6. - Synthèse des modèles de fonctionnement hydro-sédimentaire, processus d'ajustement et phases d'ajustement, observés au cours de la période 1750-2000.....</i> | <i>111</i> |
| 6.1. Modèles de fonctionnement hydro-sédimentaire | 111 |
| 6.2. Processus impliqués dans l'ajustement des modèles fluviaux..... | 112 |
| 6.3. Chronologie de l'ajustement des modèles fluviaux | 115 |
| 6.4. Conclusion du chapitre 6 | 115 |
| Conclusion de la Partie 2..... | 117 |
| Partie 3 6 Caractérisation des paléochenaux de la Garonne toulousaine : topographie, tomographies de résistivité électrique (TRE) et données sédimentaires..... | 119 |
| <i>Chapitre 7. - Démarche méthodologique mise en œuvre pour l'étude des paléochenaux de la Garonne toulousaine.....</i> | <i>121</i> |
| 7.1. Présentation des secteurs et sites d'étude..... | 122 |
| 7.2. Acquisition et traitement des données de terrain..... | 134 |
| 7.3. Interprétation des données de terrain | 145 |
| 7.4. Conclusion du chapitre 7 | 151 |
| <i>Chapitre 8. - Analyse des données de terrain : données topographiques, tomographies de résistivité électrique (TRE) et logs sédimentaires</i> | <i>153</i> |
| 8.1. Caractérisation des paléochenaux du secteur de Grenade/Ondes..... | 153 |
| 8.2. Caractérisation des paléochenaux du secteur de Verdun-sur-Garonne/ Dieupentale..... | 173 |
| 8.3. Caractérisation des paléochenaux du secteur de Cordes-Tolosannes/ Saint-Porquier..... | 189 |
| 8.4. Conclusion du chapitre 8 | 209 |
| <i>Chapitre 9. - Capacité hydraulique, phase de déconnexion et évolution post-déconnexion des chenaux au cours du dernier millénaire : disparités spatiales et temporelles.....</i> | <i>211</i> |
| 9.1. Capacités hydrauliques avant déconnexion | 211 |
| 9.2. Phases de déconnexion..... | 220 |
| 9.3. Evolution des chenaux post-déconnexion..... | 223 |
| 9.4. Discussion autour du phénomène d'incision | 224 |
| 9.5. Conclusion du chapitre 9 | 225 |
| Conclusion de la Partie 3..... | 227 |
| Partie 4 6 Trajectoire d'évolution de la Garonne toulousaine : synthèse et discussion..... | 229 |
| <i>Chapitre 10. - Reconstitution de la trajectoire d'évolution de la Garonne toulousaine à partir du croisement des données géohistoriques et stratigraphiques.....</i> | <i>231</i> |
| 10.1. Principaux apports de chacune des démarches méthodologiques mises en oeuvre | 231 |
| 10.2. Reconstitution de la trajectoire d'évolution | 231 |
| 10.3. Conclusion du chapitre 10..... | 234 |
| <i>Chapitre 11. - De l'identification d'une rupture à la recherche d'événements perturbateurs</i> | <i>237</i> |
| 11.1. Des archives sédimentaires du Moyen-Âge central à celles du XIX ^e siècle : Où est passé le Petit Âge Glaciaire (PAG) ? | 237 |
| 11.2. Le phénomène de simplification et d'homogénéisation du linéaire au cours du XX ^e siècle : une conséquence de l'activité humaine sur le chenal et dans le bassin versant..... | 239 |
| 11.3. Conclusion du chapitre 11..... | 241 |
| <i>Chapitre 12. - Mise en perspective des données produites sur la Garonne toulousaine à l'échelle européenne.....</i> | <i>243</i> |
| 12.1. L'enregistrement de l'Optimum Climatique Médiéval (OM) et de la transition OM/Petit Âge Glaciaire (PAG)..... | 243 |
| 12.2. Les chenaux du XIX ^e siècle et la phase terminale du PAG | 243 |
| 12.3. Les channel changes du XX ^e siècle..... | 244 |
| 12.4. L'ère de la reprise? | 245 |
| 12.5. Conclusion du chapitre 12..... | 247 |
| Conclusion de la Partie 4..... | 249 |
| Conclusion générale..... | 251 |
| Références bibliographiques..... | 257 |
| Sites web et Bases de données en ligne..... | 275 |
| Liste des figures..... | 277 |
| Liste des tables..... | 283 |

Acronymes

AN : Archives nationales
ANR : Agence nationale pour la recherche
AD : Archives départementales
AR : Archives régionales
BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières
DDE : Direction départementale des équipements
DDT : Direction départementale des territoires
DDR : *Drought dominated regime*
DGPS : *Differential global positioning system* (GPS différentiel)
EDH : Enveloppe de divagation historique
EFE : Environnement fluvio-estuarien
FDR : *Flood dominated regime*
GPS : *Global positioning system*
IGN : Institut national de l'information géographique et forestière
MNCE : Modèle numérique de cours d'eau
MNT : Modèle numérique de terrain
OM : Optimum Climatique Médiéval
PAG : Petit Âge Glaciaire
PHEC : Plus hautes eaux connues
RG : Réchauffement Global
SIG : Système d'information géographique
TRE : Tomographie de résistivité électrique
UT2J : Université Toulouse Jean-Jaurès
VNF : Voies navigables de France

Remerciements

Après trois années et demi concentrée sur la Garonne, les yeux sur les cartes et les mains dans la boue (dans les sédiments !), le plus doux reste à faire, remercier tous ceux et celles sans qui ces efforts n'auraient pas suffi.

.....

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur **Jean-Michel Carozza** et mon co-directeur **Philippe Valette**, pour avoir pensé ce projet de thèse et m'en avoir confié la réalisation. Je remercie en particulier Jean-Michel pour son suivi et son soutien inconditionnels tout au long de ces trois années et demi de thèse, de la découverte des premières cartes au point final du mémoire. Je remercie tout autant Philippe pour le corpus de cartes mis à ma disposition et pour son soutien permanent.

...

Je tiens aussi à remercier les membres de mon jury **Gilles Arnaud-Fassetta, Nathalie Carcaud, Alfredo Ollero, Hervé Piégay et Jean-Luc Probst** pour avoir accepté d'évaluer ce travail, en particulier les rapporteurs, qui ont consacré du temps à l'examen de ce mémoire.

...

Je tiens ensuite à remercier les personnes et structures qui m'ont donné les moyens matériels de réaliser cette thèse.

Je remercie d'abord les programmes **Gagilau** et **Adapt'eau** pour avoir financé ma bourse de thèse, une grande partie de mes outils de travail, la totalité de mes missions de terrain et divers échanges scientifiques. Je remercie aussi le laboratoire **GEODE** qui m'a accueillie dans ses murs, m'a offert la possibilité de participer à la conférence internationale de géomorphologie (IAG) de Paris en 2013 et, en cofinancement avec **l'Université Toulouse II Jean-Jaurès**, m'a permis de réaliser un échange scientifique avec l'équipe du laboratoire d'hydrographie et de géomorphologie fluviale (LABHGF) de Liège en 2015. Je remercie également le laboratoire **Ecolab** pour m'avoir accueillie plusieurs semaines en salle de granulométrie laser, ainsi que le laboratoire **GET**, qui a aimablement mis son matériel de mesure de résistivité électrique à ma disposition.

Je remercie ensuite toutes les personnes et structures qui m'ont autorisée à réaliser les campagnes de terrain nécessaires à la collecte des données traitées dans cette thèse, *i.e.* les **propriétaires des parcelles sondées** et les **mairies des communes de Castelnau d'Estrétefonds, Grenade, Ondes, Verdun-sur-Garonne, Grisolles, Cordes-Tolosannes et Saint-Porquier**, ainsi que la **DDE** en la personne de **M. Laurent Humbert**. Je remercie également les personnes qui m'ont permis de compléter le corpus de cartes historiques utilisé, *i.e.*, la **cartothèque de l'IGN** en la personne de **M. Bernard Bezes** ainsi que la cartothèque de l'université de Toulouse II Jean-Jaurès et à travers elle **Mme. Nathalie Joubert** et **M. Joseph Buosi**.

...

Il me tient particulièrement à cœur, petit padawan que je suis, de remercier celles et ceux qui m'ont apporté la formation nécessaire à la réalisation de cette étude : **Jean-Michel**, bien sur, pour son initiation à la stratigraphie et pour les divers compléments, que ce soit en dynamique fluviale ou en SIG (ainsi qu'en géologie et gastronomie du sud-ouest !), mais aussi **Muriel Llubes** pour son initiation patiente à la résistivité électrique et pour toutes les électrodes plantées ensemble, toujours dans la bonne humeur ; **Frédéric Julien** pour sa formation à la granulométrie laser et les nombreuses discussions "taille de grains" qui ont suivies ; **Hugues Barcet**, **Renaud Marti** et **Thomas Houet** pour l'utilisation du DGPS et enfin **Anaëlle Simoneau** pour ses démonstrations d'échantillonnage, de spectro-colorimétrie et de susceptibilité magnétique.

...

Après ceux qui ont nourri mon esprit, je me dois de remercier chaleureusement ceux qui ont activement contribué à produire mes données.

Merci à ceux qui ont versé des gouttes de sueur sur le terrain, pour sortir ces échantillons sédiments de la terre et planter ces électrodes : **Jean-Michel**, **Philippe** et **Muriel** bien sur, mais aussi **Tiberiu Groparu**, **Allain Pages**, **Guirec Ollivier**, **Yann Neves**, **Grégory Rabier** et **Moktar Biley Awaleh**.

Merci à **Albane et Laurent Carozza** pour les levées topographiques à la station totale (sous quelques flocons de neige)

Et un grand merci à **Amaury Labenne** pour sa contribution indispensable au traitement statistique de mes données géomorphométriques, ainsi qu'à **Vanessa Py** pour son travail de reconnaissance spécifique.

...

Je tiens aussi à remercier celles et ceux qui ont pris le temps de m'adresser quelques conseils et ont ainsi mis leur graine dans cette étude. Je tiens particulièrement à remercier **M. Gary Brierley** pour ses critiques constructives suite à la conférence I.S. Rivers 2015 et **M. Frédéric Gob** pour ses conseils donnés dans une prairie ardennaise l'automne dernier. Je remercie également les membres de mon comité de thèse, **Gilles Arnaud-Fassetta**, **Jean-Marc Antoine**, **Jean-Luc Probst** et **José-Miguel Sanchez-Pérez** qui ont clarifié mes objectifs et m'ont prévenue des pièges à éviter. Je n'oublie pas mes aînés doctorants et post-doctorants qui, par des discussions coups de vent dans les couloirs ou patientes autour d'un verre, m'ont montré la voie à suivre en me faisant part de leurs expériences: **Nicolas M.**, **Fanny R.**, **France D.**, **Elodie G.**, **Guillaume S.** et **Anaëlle S.**

...

Et une fois le gros de l'étude réalisée, ce n'est pas encore fini...

Un merci particulier à **Christiane David** et **Annabelle Moatty**, qui ont pris le temps de relire mon manuscrit malgré la thématique bien éloignée de leurs domaines.

Un merci tout aussi particulier à **Philippe et Delphine Valette** pour leurs croquis aquarellés sur le thème de la Garonne.

...

En plus de tous ceux qui m'ont aidée à réaliser ce travail de thèse, je tiens à remercier celles et ceux, rencontrés ces dernières années, qui m'ont ouvert l'esprit à de nouvelles perspectives : les membres des programmes Adapt'eau et Gagilau et notamment les **jeunes chercheurs Adapt'eau**, Guillaume, Youen, Léo, Natasha, Cyril, Julie, Amaury, Xiaoling, etc. ; l'équipe du **LABHGF de Liège**, Geoffrey Houbrecht, Alexandre Peters, Eric Hallot et François Petit ; l'équipe pédagogique de l'université Toulouse II Jean-Jaurès et particulièrement **Jean-Marc Antoine** grâce à qui j'ai pu faire mes premiers pas dans le domaine de l'enseignement et enfin **Anne-Caroline Barcet** et sa classe de CM1 2014-2015.

...

Enfin, parce que beaucoup seront d'accord pour dire qu'un travail de thèse dépend aussi du bon moral du doctorant, je tiens à remercier tous ceux qui ont passé ces années à mes côtés.

Je remercie mes collègues doctorants et permanents du GEODE pour le climat jovial et confortable dans lequel j'ai réalisé ma thèse (et pour les kg pris cette dernière année chargée en pâtisseries !), Hugues, Thomas, Cécile, Emilie L., Florence, Vanessa, Gilles C., Sandrine et Emilie G.; Nico, Raquel, Fanny, France, Nafissa et Sharazed; Tibi, Hugo, Johann, Laure, Mathilde, Renaud, David T., David L., Yayé, Zoé et Aissatou.

J'ai une pensée toute particulière pour Tibi, mon camarade de bureau, que je tiens à remercier pour son oreille amie et pour tous les bons moments passés ensemble, une tasse de thé en main, en blouse devant nos carottes respectives, concentrés sur la cuve du granulomètre, ou même à Ikea à la recherche d'un thermomètre...

Je tiens aussi bien sûr à saluer mes proches, que je remercie pour leur soutien et leur patience : mon amie de longue date Anne ; mes amies Anna, Elsa, Estelle et Elo et ma famille au grand complet, en particulier les gémenosiens, Chris, mes sœurs Emilie et Léa et mes parents bio Isabelle et Bruno. Je tiens tout particulièrement à remercier ma maman pour son soutien inconditionnel et pour le bureau improvisé.

J'ai une pensée affectueuse pour ma grande amie de thèse (mais pas que) Anna, qui s'est lancée un an avant moi, a pris soin de laisser des petits cailloux sur le chemin et a attendu patiemment que je la rejoigne au bout.

La dernière et la plus douce de mes pensées va à Thomas, qui (et je pèse mes mots) m'a supportée, écoutée, réconfortée, conseillée, motivée, soutenue et il faut bien le dire, nourrie. Merci :)

Je dédie ce travail à mes petits frères de thèse Tibi, Hugo et Johann.

Introduction

Contexte socio-environnemental

"L'empreinte de l'homme sur l'environnement global est devenue telle, qu'elle rivalise aujourd'hui avec certaines des grandes forces de la Nature, en impactant le fonctionnement du système terrestre" (Steffen et al., 2011). Le concept d'*Anthropocène* a été proposé dans les années 2000 (Crutzen et Stoermer, 2000 ; Crutzen, 2002) pour désigner la période en cours, marquée par cette empreinte des sociétés sur l'environnement. Sa limite inférieure est encore discutée, allant de 8000 BP (Ruddiman, 2013) aux années 1950 (Steffen et al., 2015), en passant par la révolution industrielle (1800 - Steffen et al., 2011).

L'état des cours d'eau représente un exemple frappant de l'emprise des sociétés sur le milieu. Dans les années 2000, 37% des grandes rivières du monde étaient qualifiées de fragmentées (écoulement perturbé par la mise en place de barrages et de canaux - Nilsson et al., 2005). En 2010, le nombre de grands barrages construits dans le monde atteignait 31635 (IGBP). En 2013, la quantité d'eau douce prélevée dans le monde s'élevait à 3,9 milliards de m³/an (FAO, AQUASTAT).

Simultanément, le *Millenium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005) proposait le bilan suivant : 1) plus de 50% des types spécifiques de zone humide dans certaines régions d'Amérique du nord, d'Europe, d'Australie et de Nouvelle Zélande ont été détruites au cours du XX^e siècle et de nombreuses autres ont été dégradées à différents endroits de la Terre ; 2) environ 20% des 10000 espèces piscicoles d'eau douce décrites dans le monde ont été qualifiées de menacées, en danger ou éteintes au cours des dernières décennies ; 3) parmi les 964 espèces d'oiseau dépendantes des zones humides, 203 sont aujourd'hui éteintes ou menacées et 4) près d'un tiers des espèces d'amphibien, ainsi que 37% des espèces de mammifères d'eau douce, sont aujourd'hui menacées.

Au cours des dernières décennies, l'arrêt de la dégradation, le maintien et la restauration des zones humides et de la biodiversité qui en dépend sont devenus des préoccupations environnementales majeures à l'échelle européenne (DCE, 2000). Dans ce cadre, la communauté scientifique a été mobilisée afin "*d'éclairer les politiques publiques et d'élaborer des outils et services mis en œuvre par les acteurs privés et publics*" (ANR).

Cadre de recherche

Entre 2010 et 2015, la Garonne, principal cours d'eau du sud-ouest français, a fait l'objet de deux programmes de recherche interdisciplinaires, centrés sur l'adaptation des systèmes fluvio-estuariens (EFE) au changement global (Denis Salles, ADBX, Irstea) : le programme Adapt'eau, financé par l'Agence Nationale de la Recherche - ANR (programme Changements Environnementaux Planétaires et Sociétés - CEPS) et le programme Gagilau, financé par les régions Aquitaine, Midi-Pyrénées et Saint-Laurent (Québec).

Le programme Adapt'eau a rassemblé des équipes issues de huit laboratoires de recherche, répartis entre Bordeaux et Toulouse :

- CERTOP - Centre d'Etude et de Recherche Travail Organisation Pouvoir (Toulouse II) ;
- Ecolab - Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement (Toulouse III) ;
- EPOC - Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (Bordeaux I) ;
- GEODE - Géographie de l'environnement (Toulouse II) ;
- GREThA - Groupe de Recherche en Economie Théorique et Appliquée (Bordeaux IV) ;

- Irstea EABX - Ecosystèmes estuariens et poissons migrateurs amphihalins (Bordeaux) ;
- Irstea EADT - Aménités et dynamiques des espaces ruraux (Bordeaux) ;
- Inria - inventeurs du monde numérique (Bordeaux I).

Dans le cadre du programme Gagilau, ces équipes françaises ont été associées à plusieurs équipes québécoises (CIRE-INRS Montréal ; INRS-ETE Québec ; UQAM, Québec ; Pêches et océans Canada). Au total, les deux programmes ont réuni environ 35 chercheurs et une dizaine de jeunes chercheurs, issus de différentes disciplines (écologie, économie, géochimie, géographie et sociologie).

Cette équipe pluridisciplinaire a été convoquée pour répondre à trois objectifs spécifiques autour de la Garonne moyenne et estuarienne, et plus ponctuellement autour du Saint-Laurent :

- 1) évaluer la vulnérabilité des socio-écosystèmes face aux impacts des variations attendues des régimes hydrologiques ;
- 2) identifier et expérimenter des options d'adaptation innovantes face au changement climatique et ses conséquences ;
- 3) produire des savoirs pour l'action par une intégration des connaissances.

Philippe Valette et Jean-Michel Carozza (GEODE) ont été chargés du volet *Géohistoire*, avec pour principale tâche, dans la logique des *Long Term Environmental Researches* (LTER), de répondre à la question suivante : Quelles leçons le temps long apporte-t-il pour comprendre et anticiper les transformations de la Garonne face au changement global?

C'est dans ce cadre que le projet de thèse présenté dans ce mémoire a été pensé et proposé. Il a reçu un soutien financier intégral de la part du programme Gagilau et a été intégré parmi les 10 projets portés par les membres de l'atelier jeunes chercheurs du programme Adapt'eau.



Problématique, objectifs de recherche et démarche méthodologique mise en œuvre

Les principaux travaux sur l'évolution de la dynamique fluviale de la Garonne moyenne (Beaudelin, 1989 ; Steiger et al., 1998 ; Steiger et Corenblit, 2000) ont mis en évidence un phénomène de chenalisation, observé depuis les années 1960 et associé à une série de facteurs de nature anthropique de la seconde moitié du XX^e siècle (extractions de granulats en lit mineur, protections de berge, barrages et prélèvements d'eau pour l'irrigation). Plusieurs éléments laissent penser que ce phénomène pourrait s'inscrire dans une tendance évolutive à plus long terme, impliquant d'autres facteurs de contrôle que ceux envisagés à ce jour, tels que les aménagements et usages anciens de la Garonne (Valette, 2002) et la transition climatique entre le Petit Âge Glaciaire (PAG) et le Réchauffement Global (RG) actuel. Toutefois, contrairement à de nombreux cours d'eau européens, l'évolution de la dynamique fluviale de la Garonne à moyen terme (100 à 1000 ans) est à ce jour méconnue. Cette donnée représente pourtant un pré-requis indispensable à la mise en œuvre de projets de restauration hydromorphologique, susceptibles d'être envisagés dans les années à venir.

En conséquence, l'objectif spécifique de ce travail de thèse est *la reconstitution de la trajectoire évolutive de la Garonne toulousaine*, d'un point de vue hydro-géomorphologique et sur une échelle de temps pluriséculaire. La démarche méthodologique mise en œuvre repose sur la complémentarité spatiale et chronologique de deux types de sources : 1) neuf cartes historiques couvrant la période 1750-2000 et 2) une série de données de terrain (carottes sédimentaires, tomographies de résistivité électrique et profils topographiques) collectées sur 11 sites d'études supposés correspondre à des paléochenaux de la Garonne.

Organisation de la thèse

Cette thèse est structurée en quatre parties, chacune divisée en trois chapitres.

La première partie détaille les grandes lignes de l'étude. Le chapitre 1 délimite le cadre thématique en présentant les éléments ayant servi à déterminer le point de vue défendu (faits socio-environnementaux, courants de pensée et concepts scientifiques). Le chapitre 2 définit le cadre physique de l'étude en décrivant l'organisation du bassin versant de la Garonne et les spécificités de la Garonne toulousaine. Le chapitre 3 annonce la problématique de recherche et la démarche méthodologique globale mise en œuvre.

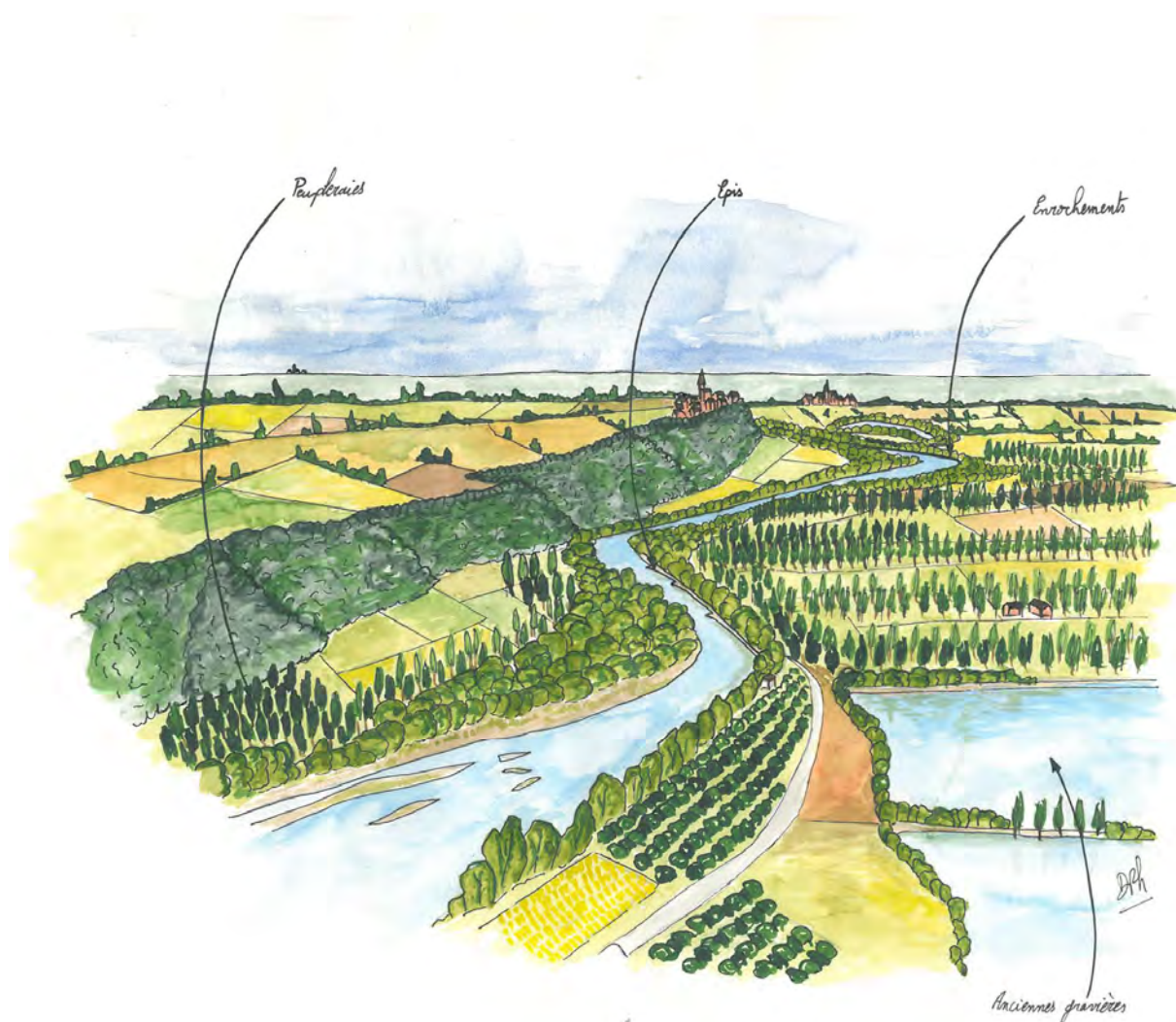
La deuxième partie expose le volet de l'étude centré sur les sources cartographiques historiques représentant la Garonne toulousaine entre les années 1750 et les années 2000. Le chapitre 4 présente la démarche méthodologique mise en œuvre pour l'analyse de ces documents. Le chapitre 5 présente les résultats de cette analyse (traitement statistique univarié, traitement statistique multivarié et analyse qualitative). Le chapitre 6 synthétise les principaux apports (modèles de fonctionnement hydro-sédimentaire identifiés, processus d'ajustement observés et chronologie d'évolution établie).

La troisième partie présente le volet de l'étude centré sur les données de terrain, issues du sondage de 11 sites d'étude, supposés correspondre à des paléochenaux de la Garonne. Le chapitre 7 détaille la démarche méthodologique mise en œuvre pour acquérir et analyser les données de terrain. Le chapitre 8 expose les données obtenues pour chacun des secteurs d'étude (profils topographiques, tomographies de résistivité électrique et logs sédimentaires). Le chapitre 9 propose une synthèse et une discussion de ces résultats, mettant en évidence des discontinuités spatiales et temporelles.

La quatrième partie propose une synthèse, une discussion et une mise en perspective de l'ensemble des résultats. Le chapitre 10 propose une reconstitution de la trajectoire d'évolution de la Garonne toulousaine à partir du croisement des données issues de l'étude des cartes historiques et des données de terrain. Le chapitre 11 amène une discussion autour des facteurs de contrôle potentiels de cette évolution. Enfin, le chapitre 12 compare les résultats obtenus avec des données issues de travaux antérieurs concernant d'autres cours d'eau européens.

Partie 1 – Présentation de l'étude : cadre thématique, cadre physique, problématique et stratégie du projet de thèse

L'objectif de cette première partie est de présenter l'étude réalisée, en ciblant différents niveaux d'analyse. Le premier chapitre présente le cadre thématique, *i.e.*, le contexte socio-environnemental, les courants de pensée et les concepts scientifiques qui déterminent le point de vue défendu dans cette thèse. Le deuxième chapitre présente le terrain d'étude et ses particularités. Il délimite ainsi le cadre physique de la thèse. Enfin, le troisième chapitre définit les questions et objectifs de recherche de l'étude, ainsi que la démarche méthodologique mise en œuvre pour répondre aux objectifs ciblés.



Philippe et Delphine Valette

Chapitre 1. - Cadre thématique : le changement fluvial de l'Anthropocène, un enjeu socio-environnemental

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter le point de vue sur lequel repose cette thèse, *i.e.*, les faits socio-environnementaux, les courants de pensée et les concepts scientifiques qui déterminent notre approche de la dynamique fluviale de la Garonne.

Dans cette optique, ce chapitre expose d'abord la perception actuelle des cours d'eau en tant que systèmes environnementaux complexes (1), puis aborde la question du fonctionnement hydro-sédimentaire et de l'enjeu que représente ce fonctionnement pour les sociétés (2). Les changements observés sur les cours d'eau européens au cours des derniers siècles qui composent l'Anthropocène et les conséquences de ces changements sont ensuite développés (3). Un dernier point met enfin l'accent sur le mode d'adaptation de l'homme face au changement et souligne ainsi l'enjeu d'un travail de recherche sur la trajectoire d'évolution historique d'un tronçon fluvial (4).

1.1. Le cours d'eau en tant que système environnemental complexe

A l'heure actuelle, en Europe et dans la plupart des pays occidentaux, la manière dont les problématiques environnementales liées à la dynamique fluviale sont définies, étudiées et traitées, dépend fortement d'une approche systémique de l'environnement (Chorley, 1962). Deux concepts majeurs formalisent l'approche systémique des cours d'eau et sont souvent articulés (*e.g.*, Dufour, 2005 ; Rollet, 2007 ; Arnaud, 2012 ; Melun, 2012 ; Garnier, 2013) : le système fluvial (Schumm, 1977) et l'hydrosystème fluvial (Amoros et Petts, 1993).

Le concept de *système fluvial* a été formalisé et synthétisé dans les années 1970 aux Etats-Unis dans l'ouvrage du géomorphologue Stanley A. Schumm : *The fluvial system* (1977). Ce concept appréhende le cours d'eau au sein de son bassin versant et met en évidence les liens existant entre l'organisation amont/aval du bassin et les flux de matière (eau et sédiment). Cette approche se résume par un modèle "idéal" organisé en trois zones (Fig. 1.1) :

- La zone 1 correspond à la zone amont du système (le bassin de drainage). C'est la zone de production de la charge alluviale, au sein de laquelle les processus d'érosion sont dominants par rapport aux processus de dépôt. C'est aussi la zone de formation de la majeure partie des flux liquides.

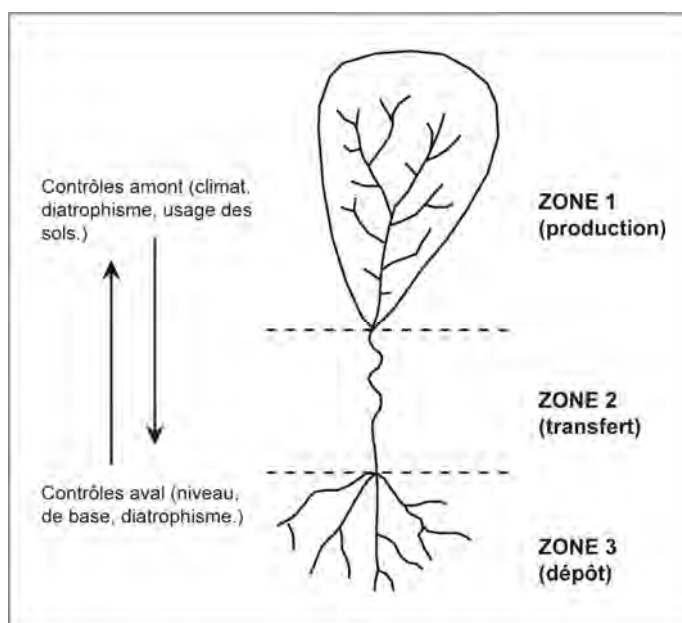


Figure 1.1 : The *idealized fluvial system* (modifié d'après Schumm, 1977).

- La zone 2 correspond à la zone de transfert, par laquelle l'eau et la charge alluviale transitent de la zone 1 vers la zone 3. Dans cette zone, les processus d'érosion et de dépôt agissent à proportion égale.
- La zone 3 est la zone de stockage à l'aval du bassin versant, où la charge alluviale s'accumule. Dans cette zone les processus de dépôt sont dominants.

L'*hydrosystème fluvial* est un concept plus récent, qui a été pensé en France dans un contexte de recherche interdisciplinaire (programme PIREN-Rhône, 1978-1993) et qui a été formalisé dans l'ouvrage collaboratif *Hydrosystèmes fluviaux* (Amoros et Petts, 1993). A la différence du système fluvial, l'hydrosystème fluvial comporte une dimension écologique forte et met l'accent sur l'interdépendance entre le cours d'eau et sa plaine alluviale. Il se définit ainsi comme un ensemble d'écosystèmes aquatiques, semi-aquatiques et terrestres, aussi bien épiques que souterrains, qui s'organisent hiérarchiquement et qui interagissent par le biais de flux en quatre dimensions (Roux, 1982 ; Amoros et al., 1987 ; Amoros et Petts, 1993). Les trois premières dimensions sont d'ordre spatial (Fig. 1.2) :

- la dimension longitudinale correspond aux flux unidirectionnels le long du gradient amont/aval ;
- la dimension transversale correspond aux flux bidirectionnels de surface, du cours d'eau vers la plaine alluviale ;
- la dimension verticale correspond aux échanges entre les différents écosystèmes superposés, aussi bien à proximité du cours d'eau que sur les marges de la plaine.

La quatrième dimension correspond à la dimension temporelle, qui traduit le caractère dynamique du système. Elle fait référence aux modifications opérées à différentes échelles de temps, de l'événement ponctuel au processus agissant à très long terme (10^3 - 10^4 ans et plus).

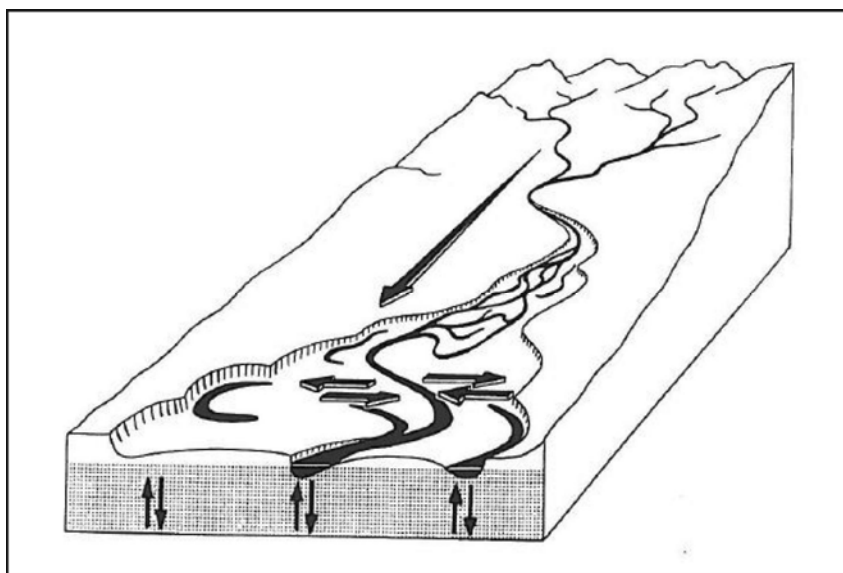


Figure 1.2 : Schématisation des flux bidirectionnels selon la dimension transversale (échanges avec les divers écosystèmes de la plaine alluviale) et la dimension verticale (échanges avec le domaine souterrain de l'aquifère alluvial - Amoros et Petts, 1993).

L'apport d'un croisement entre ces deux approches pour l'étude d'un tronçon fluvial, réside dans la prise en compte de la position de ce tronçon au sein de son bassin versant,

tout en considérant les échanges complexes existant entre le cours d'eau et sa plaine alluviale.

La prise en compte additionnelle du concept plus récent d'*anthroposystème* (Lévêque et al., 2003), permet par ailleurs de souligner l'implication des sociétés dans ce système complexe ("*système interactif entre deux ensembles constitués par un (ou des) sociosystème(s) et un (ou des) écosystème(s) naturel(s) et/ou artificialisé(s) s'inscrivant dans un espace géographique donné et évoluant dans le temps*").

1.2. L'enjeu socio-environnemental du fonctionnement hydro-sédimentaire des cours d'eau

En tant que système environnemental complexe, le cours d'eau se caractérise par un fonctionnement dépendant de très nombreuses variables en interaction. Ce fonctionnement complexe, abordé dans cette thèse sous les termes *fonctionnement hydro-sédimentaire* ou *dynamique fluviale*, représente aujourd'hui un enjeu fort pour les sociétés. Il est en effet source de bénéfices et bien-être divers, dits *services écosystémiques*.

1.2.1. Principe de fonctionnement hydro-sédimentaire des cours d'eau : notions d'équilibre dynamique et d'ajustement

Le fonctionnement hydro-sédimentaire d'un cours d'eau alluvial repose sur l'équilibre continu entre deux variables, dites *variables de contrôle* : la charge alluviale imposée au cours d'eau et le débit liquide qui fournit l'énergie nécessaire au transport de cette charge. Cet équilibre est permis par une autorégulation du chenal via un mécanisme de rétroaction négative, schématisé par la balance de Lane (1955 ; Fig. 1.3) : les plateaux de la balance représentent la charge solide d'un côté, caractérisée par sa granulométrie ; le débit liquide de l'autre, dépendant de la pente du cours d'eau. Lorsque l'un ou l'autre des plateaux déséquilibre la balance (en cas d'augmentation ou de réduction du débit ou de la charge alluviale), un processus d'érosion ou d'aggradation se met en œuvre. Ce processus vient jouer sur la granulométrie de la charge solide mobilisée et/ou sur la pente du cours d'eau et rétablit ainsi l'équilibre du système. D'un point de vue systémique, cet ajustement permanent des différentes variables autour de conditions moyennes correspond à un *équilibre dynamique* (Chorley, 1962 ; Hack, 1976 ; Schumm, 1977).

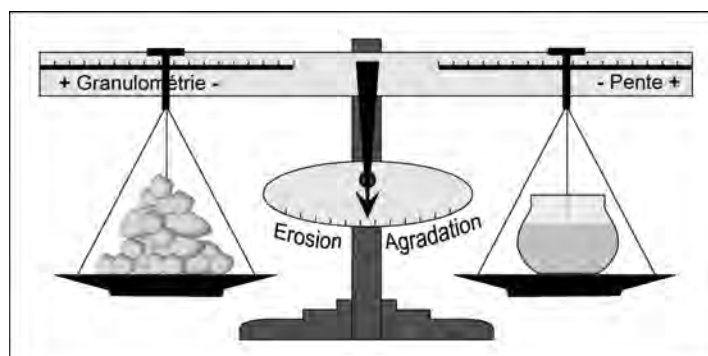


Figure 1.3 : Balance de Lane (modifié d'après l'USDA)

Le fonctionnement hydro-sédimentaire des cours d'eau tel que schématisé par Lane (1955) reste une vue relativement simplifiée d'un processus plus complexe. Outre la pente et la granulométrie de la charge solide, les cours d'eau disposent d'un grand nombre de

variables morphologiques, dites *variables de réponse* (largeur, profondeur, sinuosité du chenal, etc.) susceptibles de s'ajuster aux variations des variables de contrôle. Schumm, (1977) a ainsi proposé une série de relations empiriques montrant les types d'ajustements susceptibles de se produire en cas de variation d'une ou des deux variables de contrôle (Table 1.1).

| Modification d' <u>une</u> variable de contrôle | | Modification <u>des deux</u> variables de contrôle | |
|---|----------------------------------|--|---|
| Variables de contrôle | Ajustements | Variables de contrôle | Ajustements |
| Q^+ | l^+, z^+, λ^+, p^- | $Q^+ \text{ et } Q_s^+$ | $l^+, z^{+/-}, \lambda^+, p^{+/-}, l/p^-, SI^+$ |
| Q^- | l^-, z^-, λ^-, p^+ | $Q^- \text{ et } Q_s^-$ | $l^-, z^{+/-}, \lambda^-, p^{+/-}, l/p^+, SI^-$ |
| Q_s^+ | $l^+, z^-, \lambda^+, p^+, SI$ | $Q^+ \text{ et } Q_s^-$ | $l^{+/-}, z^+, \lambda^{+/-}, p^-, l/p^+, SI$ |
| Q_s^- | $l^-, z^+, \lambda^-, p^-, SI^+$ | $Q^- \text{ et } Q_s^+$ | $l^{+/-}, z^-, \lambda^{+/-}, p^+, l/p^-, SI^+$ |

Table 1.1 : Relations empiriques entre les variations des variables de contrôle et les variations des variables de réponse (Schumm, 1977). Q : débit liquide ; Q_s : débit solide ; l : largeur du chenal ; z : profondeur du chenal ; λ : longueur d'onde des méandres ; p : pente ; l/p : ratio largeur/profondeur ; SI : sinuosité

1.2.2. Les contraintes du milieu sur le fonctionnement hydro-sédimentaire

Le fonctionnement hydro-sédimentaire des cours d'eau est conditionné par le milieu dans lequel ils évoluent, *i.e.*, par une combinaison de facteurs topographiques, géologiques, climatiques, biogéographiques et anthropiques (Schumm et Lichty, 1965 ; Schumm, 1977). Deux types de facteurs peuvent être distingués (Fryirs et Brierley, 2013) : les *conditions imposées* (*imposed boundary conditions*) et les *conditions de flux* (*flux boundary conditions*).

Les conditions imposées sont celles qui ne changent pas sur une échelle de temps pluriséculaire à plurimillénaire. Il s'agit des facteurs qui déterminent le relief, la pente et la morphologie de la vallée. La géologie du bassin versant (caractéristiques tectoniques et lithologiques), représente une condition imposée majeure car elle détermine les altitudes et le relief (*i.e.*, la pente et donc l'énergie associée à la lame d'eau), ainsi que le type et la quantité de sédiment susceptible d'être mobilisé par la lame d'eau.

Les conditions de flux déterminent l'énergie qui caractérise le système fluvial. Le climat représente une condition de flux majeure car il détermine la pérennité, la quantité et la variabilité des écoulements, la fréquence et l'intensité des événements de crue, ainsi que l'efficacité des événements extrêmes. Le climat exerce aussi un rôle sur la météorisation des roches, ainsi que sur le couvert végétal, qui définit en partie le niveau de stabilité des versants et des berges.

1.2.3. De la diversité des milieux à la diversité morphologique des chenaux : les styles fluviaux

Les conditions limites qui caractérisent les milieux dans lesquels les cours d'eau s'écoulent déterminent leur *style fluvial* (*fluvial pattern* - Leopold et Wolman, 1957), *i.e.*, le modèle de formes en plan du chenal. A l'échelle de la planète, voire même à l'échelle du bassin versant, la diversité des milieux est à l'origine d'un grand nombre de styles fluviaux.

Sur la base de travaux empiriques, Leopold et Wolman (1957 ; Fig. 1.4) ont identifié trois styles fluviaux dominants (*tressage*, *méandrage* et *rectiligne*), auxquels un quatrième style a plus tard été ajouté (*anabranche* - Ferguson, 1987 ; Knighton et Nanson, 1993) :

- Le style dit *rectiligne* (*straight* - Wang et Ni, 2002) se caractérise par un chenal unique et un indice de sinuosité faible (ratio entre longueur du chenal et longueur de la vallée). Ce style est peu présent en condition naturelle et concerne surtout les chenaux de cône alluvial à forte énergie et forte charge ou les cours d'eau fortement anthropisés.
- Le *méandrage* (*meandering* - Leopold et Wolman, 1960 ; Brice, 1974 ; Hickin, 1974 ; Hooke, 1987, 2007a, 2007b ; etc.) se distingue du style rectiligne par une sinuosité plus forte. Selon les conditions du milieu dans lequel il évolue, un chenal à méandre peut s'ajuster de manière particulièrement dynamique, par le biais de migrations latérales et par recoupement des boucles de méandre.
- Le style en *tresse* (*braided* - Smith, 1972 ; Miall, 1977 ; Rust, 1978 ; Ashmore, 1982 ; Rundle, 1985 ; Sambrook Smith et al., 2006) se caractérise par la présence de bancs alluviaux mobiles peu ou pas végétalisés, qui divisent le lit en chenaux multiples. Ce style se retrouve plutôt en contexte de pente forte, avec une fourniture alluviale abondante.
- Le style à *anastomose* (*anastomosing* - Schumm, 1968, 1981 ; Ferguson, 1987 ; Rust, 1978 ; Smith, 1983 ; Brice, 1984 ; Knighton et Nanson, 1993 ; Makaske, 2001) concerne des systèmes à chenaux multiples, séparés par des îles plus larges que les chenaux eux-mêmes et plus stables que dans le cas du tressage. Les anabranches de ces systèmes sont parfois appréhendées individuellement comme des chenaux rectilignes ou méandriques.

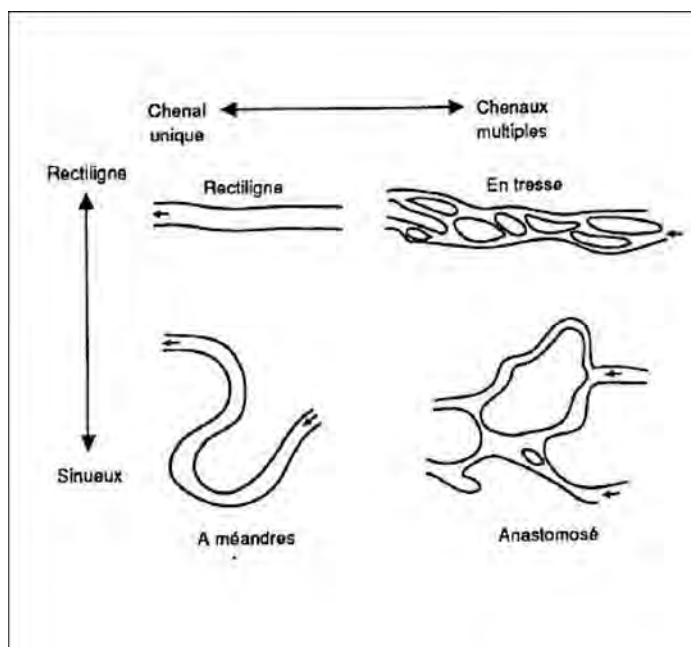


Figure 1.4 : Classification de référence des styles fluviaux (Amoros et Petts, 1993, d'après la classification de Rust, 1978)

Depuis les travaux de Leopold et Wolman (1957), de nombreuses études ont permis d'affiner notre compréhension de chaque style fluvial pris individuellement (cf. références citées précédemment) ou d'affiner les critères de discrimination de ces styles fluviaux par la proposition de nouvelles classifications.

Les différents types de classifications publiées peuvent être regroupés selon les démarches de discrimination mises en œuvre (Eaton et al., 2010 ; Buffington et Montgomery, 2013). De ce point de vue, les systèmes de classification dits *quantitatifs* s'attachent à distinguer les différents styles fluviaux par la définition de valeurs seuils pour différentes variables, telles que la pente, le débit, la granulométrie, la charge sédimentaire, la végétation riparienne, ou encore, la rugosité, la largeur ou la profondeur du chenal (e.g., Fig. 1.5-A - Leopold et Wolman, 1957 ; Henderson, 1963 ; Ferguson, 1987 ; Knighton et Nanson, 1993 ; Beechie et al., 2006 ; etc.). Ce type de classification permet de prédire un style fluvial, ainsi que d'évaluer le potentiel de changement pour une perturbation donnée. Toutefois, ces approches sont très souvent empiriques et s'appliquent donc à des chenaux caractéristiques d'un bassin donné. Au contraire, les systèmes de classification dits *conceptuels* s'appuient sur des modèles théoriques pour comprendre les facteurs de contrôle de la morphologie du

chenal ainsi que la réponse potentielle du débit et de la charge sédimentaire, mais sont principalement qualitatifs et ont souvent été pensés pour les cours d'eau de grande plaine alluviale (e.g., Fig. 1.5-B - Schumm, 1963, 1977, 1981, 1985 ; Paustian et al., 1992 ; Brice, 1982 ; Rosgen, 1994 ; Brierley et Fryirs, 2005 ; Church, 2006).

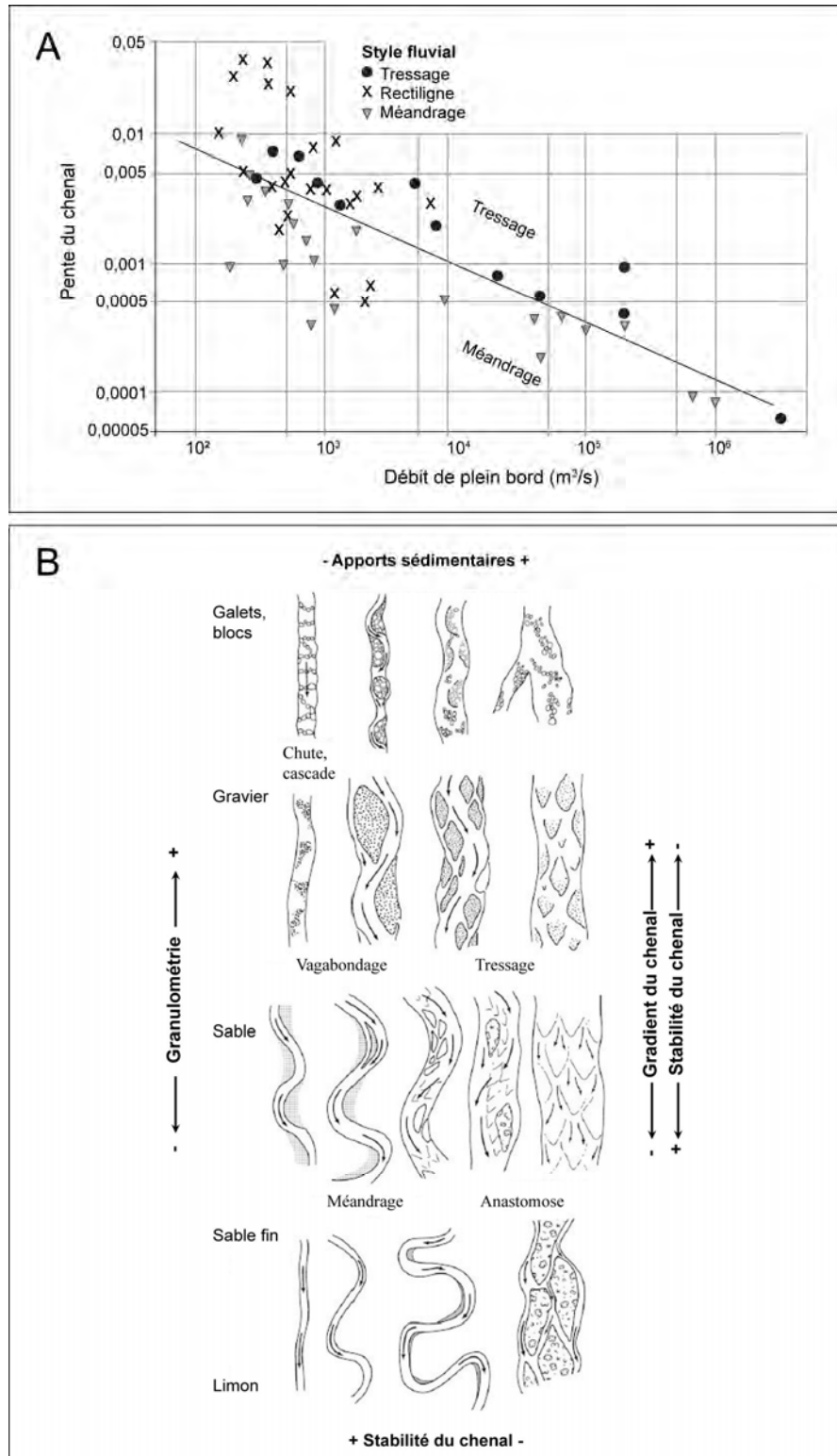


Figure 1.5 : Exemples de classification des styles fluviaux. A - Classification quantitative (modifiée d'après Leopold et Wolman, 1957). B - Classification descriptive (modifié d'après Church, 2006).

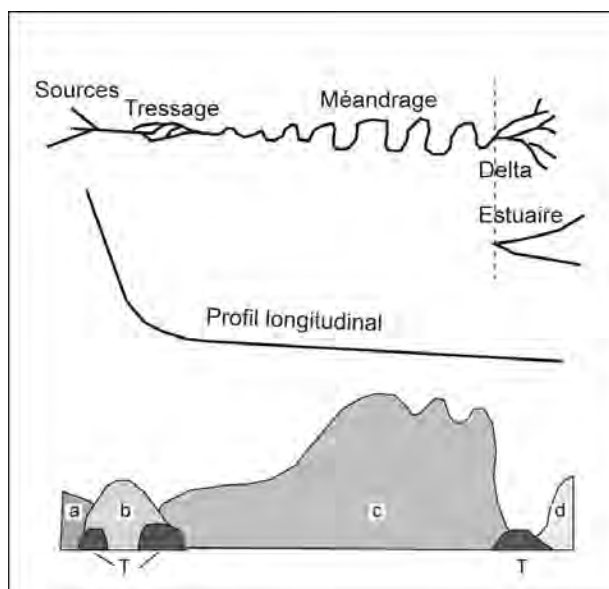
Au sein d'un bassin versant, la forme des vallées, la largeur et la profondeur des chenaux, ainsi que la pente et le débit, sont autant de paramètres qui varient de l'amont vers l'aval. Ce gradient amont/aval se traduit par une évolution des styles fluviaux (Fig. 1.6 - Amoros et Petts, 1993 ; Leopold et Wolman, 1957). Dans les zones les plus en pente, situées dans la partie amont du bassin versant, les chenaux ont généralement tendance à présenter des tracés rectilignes, puis à tresser. Avec l'augmentation du débit et la réduction de la pente, une tendance au méandrage se met ensuite progressivement en place à la transition entre les vallées montagnardes et les écoulements de plaine. A l'aval du système, on observe généralement un élargissement des boucles de méandre, en même temps que le débit augmente.

Ce modèle théorique peut toutefois varier. *E.g.*, si l'érosion des berges est impossible, le cours d'eau tendra plutôt vers le style rectiligne ; si le matériel du lit et des berges est grossier et fortement érodable ou si la charge de fond est dominante, le cours d'eau tendra plutôt vers le tressage. Par ailleurs, il existe de nombreuses *discontinuités* dans le gradient amont/aval (Amoros et Petts, 1993), avec notamment un effet des affluents, qui peuvent injecter une charge alluviale importante dans le cours principal et ainsi modifier ses caractéristiques, voire rétablir temporairement les conditions observées plus en amont.

1.2.4. De la diversité morphologique à la diversité spécifique au sein du système fluvial et de l'hydrosystème fluvial

Le gradient amont/aval génère une succession de milieux, qui peut notamment être abordée par le biais du concept de *continuum fluvial* (Vannote et al., 1980). Le continuum fluvial se définit comme la succession de trois domaines distincts, avec : 1) le domaine amont qui se caractérise généralement par un chenal étroit, une végétation dense et une luminosité réduite, conduisant à une forte concentration en matière organique dans l'eau et ainsi à la dominance des organismes hétérotrophes (organismes qui se nourrissent de constituants organiques) ; 2) le domaine intermédiaire, qui correspond à un secteur où le cours d'eau est plus large, mieux exposé à la lumière et où la teneur en matière organique est réduite, conduisant ainsi à une dominance des organismes autotrophes (organismes produisant de la matière organique par réduction de matières inorganiques) et 3) le domaine aval, qui correspond à un secteur où le cours d'eau est particulièrement large et profond et où la lumière ne pénètre plus dans la totalité de la lame d'eau, provoquant ainsi un retour des organismes hétérotrophes. Ce gradient se retrouve dans l'organisation des communautés végétales et animales, avec *e.g.*, des communautés piscicoles de courant rapide en amont, des communautés de courant plus lent dans la partie médiane et des communautés marines à l'aval du système (Fig. 1.6 - Amoros et Petts, 1993).

Figure 1.6 : Distribution schématique des communautés faunistiques le long du profil longitudinal d'un fleuve, modifié d'après Amoros et Petts (1993). a) communautés des sources ; b) communautés de courants rapides ; c) communautés de courants plus lents ; d) communautés marines ; T) communautés de transition. La hauteur des zones traduit le nombre d'espèces.



Par ailleurs, les parties médianes/intermédiaires des continuums se caractérisent par des plaines alluviales larges, qui correspondent aux secteurs les plus complexes et les plus riches en espèces (Schnitzler-Lenoble, 2002).

L'action des processus d'érosion et de dépôt, notamment la migration des chenaux, génère des paysages hétérogènes. Sur un transect transversal, on peut ainsi distinguer (Barnaud et Fustec, 2007 - Fig. 1.7) : le lit mineur, les grèves, les bourrelets de berge, les annexes hydrauliques (chenaux secondaires et anciens bras entièrement ou partiellement déconnectés du chenal principal), les levées et les zones exhausées. Les communautés végétales se répartissent sur ce transect, principalement en fonction de la fréquence et de la durée des submersions, du niveau moyen de la nappe et de l'amplitude de ses variations. Du lit mineur vers les terrasses, on observe généralement (Barnaud et Fustec, 2007 - Fig. 1.7) : 1) des communautés aquatiques installées dans le lit mineur ; 2) des communautés herbacées sur les grèves souvent submergées ; 3) des communautés arbustives et arborées pionnières sur les zones toujours saturées en eau et périodiquement inondées (ripisylve) et 4) des communautés arborées post-pionnières dans les espaces les moins souvent inondés. Ces bandes sont souvent fragmentées par diverses dépressions en eau, occupées par des groupements d'herbacées pionnières.

Cette mosaïque de milieux forme des habitats nombreux et diversifiés pour les espèces animales (Barnaud et Fustec, 2007) : amphibiens (reproduction et vie larvaire en milieu aquatique / stade adulte en milieu terrestre) ; poissons (reproduction et jeunesse dans les annexes hydrauliques alimentées en période de crue ; répartition des espèces dans différents secteurs selon le courant, la profondeur et la température de l'eau) ; oiseaux (reproduction dans les strates élevées de la forêt alluviale, mues, relais migratoires, hivernage) et mammifères (brouette et/ou chasse).

Par ailleurs, la présence d'une zone hyporhéique ("*ensemble des sédiments saturés en eau, situés au dessous et à côté d'une rivière, contenant une certaine proportion d'eau de surface*" - White, 1993) assure le maintien d'une communauté d'invertébrés benthiques souvent très abondante (Boulton et al., 1998 ; Datry et al., 2008), ainsi que différentes fonctionnalités pour des espèces provenant des eaux de surface ou adaptées aux eaux souterraines (Ward et al., 1998 ; Malard et al., 2002).

Ainsi, bien que les milieux humides ne couvrent que 6% de la surface des continents, ils représentent un lieu de vie pour 12 à 15% de la faune mondiale (Lévêque, 2001 ; Barnaud et Fustec, 2007).

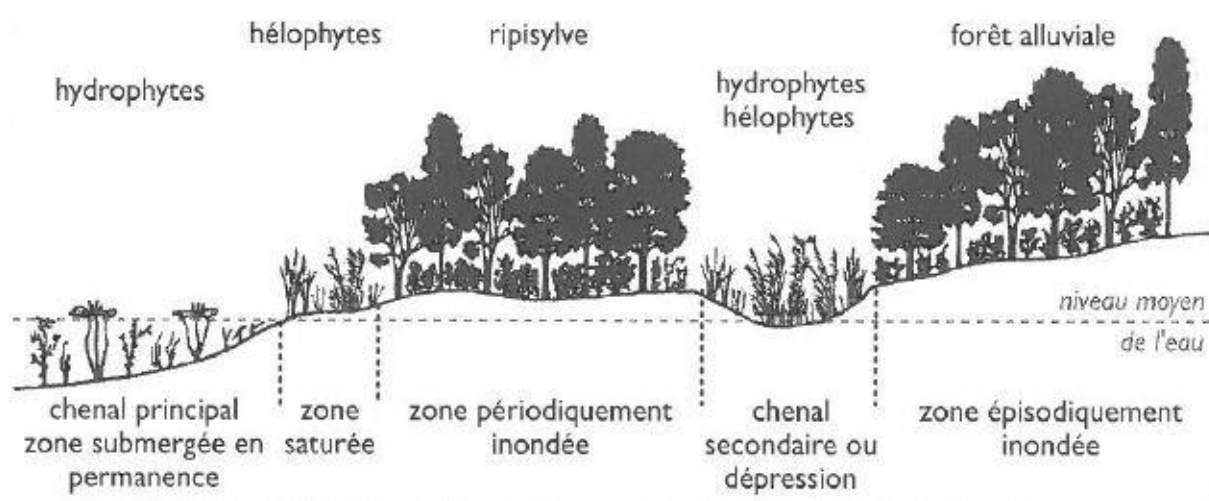


Figure 1.7 : Représentation d'une succession végétale de plaine alluviale (Barnaud et Fustec, 2007).

1.2.5. La richesse et la diversité spécifiques comme service écosystémique

La richesse et la diversité spécifiques particulièrement fortes qui caractérisent les systèmes fluviaux, font partie intégrante d'un ensemble de *services écosystémiques* (Westman, 1977), *i.e.*, de bénéfices obtenus par l'homme des écosystèmes (Seppelt et al., 2011). Bien que cette notion relève à l'origine du domaine économique, elle ne désigne pas le seul bénéfice économique direct mais différents types de fonctionnalités utiles à l'homme. Quatre types de fonctionnalités distincts sont généralement reconnus : les *fonctions de production*, les *fonctions d'habitat*, les *fonctions de régulation*, et les *fonctions d'information* (De Groot et al., 2000).

Les hydrosystèmes fluviaux sont avant tout associés à des *fonctions de production*, qui désignent la capacité d'un écosystème à fournir des biens consommables par l'homme, allant de la nourriture et des matières premières aux ressources énergétiques et matériels génétiques. Les cours d'eau apportent en effet des matières premières (eau, sédiment, sol cultivable), des espèces consommables (*e.g.*, poissons de rivière) et représentent par ailleurs une source d'énergie (production hydro-électrique).

Comme explicité précédemment, les hydrosystèmes fluviaux sont aussi associés à des *fonctions d'habitat*, qui désignent la capacité de refuges et d'habitats de reproduction d'un écosystème pour la faune et la flore, et par là même la capacité de conservation de la biodiversité et des processus d'évolution.

Les *fonctions de régulation* font ensuite référence à la capacité d'un écosystème à réguler des processus écologiques essentiels, à travers des cycles bio-géochimiques et autres processus biosphériques. Dans le cas des hydrosystèmes fluviaux, cette fonction réside notamment dans le rôle épurateur des crues, lié au cycle de l'azote dans la forêt alluviale (Ruffinoni et al., 2003).

Les *fonctions d'information* désignent enfin à la fois le rôle de référentiel qu'un écosystème naturel peut jouer pour l'évolution humaine, et l'apport social lié aux opportunités de réflexion, d'enrichissement spirituel, de développement cognitif et d'expériences récréatives et esthétiques des milieux ou processus naturels. *E.g.*, la possibilité de se promener et de se détendre sur les berges d'une rivière, de profiter d'activités sportives d'eau vive, de trouver l'inspiration artistique dans l'observation des paysages fluviaux, etc.

1.3. Le changement fluvial de l'Anthropocène et l'altération des milieux

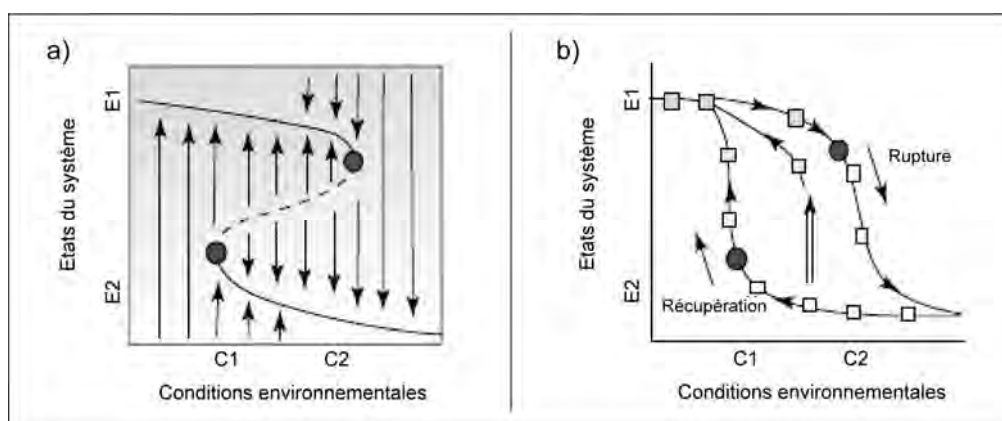
Contrairement au comportement fluvial (*river behaviour*) abordé précédemment (cf. 1.2), qui décrit les ajustements qui se produisent pour un certain type de rivière, l'évolution fluviale (*river change*) désigne un changement global du style fluvial et du régime comportemental associé (Fryirs et Brierley, 2013). Depuis plusieurs décennies, un changement de comportement est observé sur la plupart des cours d'eau européens, qui se traduit par une altération de fonctionnement des milieux alluviaux et des divers enjeux socio-environnementaux associés. De ce fait, le changement fluvial est devenu un enjeu de recherche fort.

1.3.1. Principe du changement fluvial : les notions de pression, hystérésis, sensibilité à l'ajustement et temps de réponse

Au cours du temps, un tronçon fluvial est soumis à différentes perturbations, susceptibles de modifier son comportement (Graf, 1977). Deux types de perturbation sont généralement distingués (Lake, 2000 ; Fryirs et Brierley, 2013) : l'*impulsion* (*pulse*), qui correspond à un événement de forte intensité mais de faible fréquence et de durée limitée (e.g., une crue saisonnière) et la *pression* (*press*), qui implique une variation de l'une ou des deux variable(s) de contrôle à plus long terme et qui concerne généralement des zones plus larges (e.g., modification du régime hydrologique sous l'effet d'un changement climatique).

En cas de perturbation de type impulsion, un tronçon fluvial peut s'éloigner quelques temps du style fluvial qui le caractérisait à l'instant T où la perturbation s'est produite, avant d'y revenir progressivement. En cas de perturbation de type pression, un phénomène de seuil est susceptible de se produire, à partir duquel le tronçon fluvial ne sera plus en mesure de revenir à son style fluvial initial et évoluera alors vers un autre style. Pour que le tronçon fluvial revienne à son état initial par le biais d'un processus de récupération, une nouvelle perturbation devra se produire (Fig. 1.8). Ce phénomène d'hystérésis, impliquant un changement d'état du système sur une échelle de temps comprise entre plusieurs décennies et plusieurs siècles (Knighton, 1984), peut être abordé sous les termes de *changement fluvial* ou *métamorphose fluviale* (Schumm, 1969).

Tous les cours d'eau ne réagissent pas de manière équivalente à une perturbation. Selon les conditions du milieu dans lequel un tronçon fluvial évolue, ce tronçon peut présenter différents niveaux de *sensibilité à l'ajustement* (Brundsen et Thomes, 1979 ; Hooke et Redmond, 1992 ; Downs et Gregory, 1993, 2004 ; Brierley et Fryirs, 2005 ; Downs et al., 2013 ; Reid et Brierley, 2015). Si le chenal répond facilement et régulièrement aux perturbations, il sera ainsi considéré comme *sensible* et sera sujet à un changement fluvial ; si au contraire les réponses sont peu significatives et rares, il sera considéré comme *résilient* au changement (Reid et Brierley, 2015). Une distinction additionnelle peut être faite concernant le *temps de réaction* du système (période entre la perturbation et la réponse du système à cette perturbation ; Graf, 1977). Un système caractérisé par un temps de réaction important est dit à forte capacité d'absorption (*buffering capacity* ; Fryirs et Brierley, 2013).



1.3.2. Les changements observés sur les cours d'eau européens au cours du XX^e siècle

Depuis plusieurs décennies, un véritable courant de recherche s'est développé autour de la thématique des *channel changes*, mettant en évidence le changement de comportement d'un grand nombre de cours d'eau, notamment en Europe. En 2003, au moins une cinquantaine de publications européennes sur les signes localisés de ce phénomène était déjà comptabilisée, dont une trentaine concernait des cours d'eau français (Arnaud-Fassetta, 2003). Au cours de la dernière décennie, la littérature sur les *channel changes* s'est considérablement étendue, soulignant ainsi la globalité du phénomène (Table 1.2).

| Auteurs | Date | Titre |
|--------------------------------|------|---|
| Ollero | 2010 | Channel changes and floodplain management in the meandering middle Ebro River, Spain |
| Zawiejska et Wyzga | 2010 | Twentieth-century channel change on the Dunajec River, southern Poland : Patterns, causes and controls |
| Magdaleno et Fernandez-Yuste | 2011 | Meander dynamics in a changing river corridor |
| Kiss et Blanca | 2012 | River channel response to climate and human induced hydrological changes : Case study on the meandering Hernád River, Hungary |
| Ziliani et Surian | 2012 | Evolutionary trajectory of channel morphology and controlling factors in a large gravel-bed river |
| Radoane et al. | 2013 | Changes in the channel-bed level of the eastern Carpathian rivers : Climatic vs. human control over the last 50 years |
| Segura Beltran et Sanchis Ibor | 2013 | Assessment of channel changes in a Mediterranean ephemeral stream since the early twentieth century. The Rambla de Cervera, eastern Spain |
| Skarpich et al. | 2013 | Complex transformation of the geomorphic regime of channels in the forefield of the Moravskoslezské Beskydy Mts/ : Case study of the Moravka River (Czech Republic) |
| Bollati et al. | 2014 | Reach-scale morphological adjustments and stages of channel evolution : The case of the Trebbia River (northern Italy) |
| Campana et al. | 2014 | Channel degradation and restoration of an Alpine river and related morphological changes |
| Latapie et al. | 2014 | Assessing channel response of a long river influenced by human disturbance. |
| Provansal et al. | 2014 | The geomorphic evolution and sediment balance of the lower Rhône River (southern France) over the last 130 years : Hydropower dams versus other control factors |
| Toone et al. | 2014 | Spatial discontinuity and temporal evolution of channel morphology along a mixed bedrock-alluvial river, upper Drôme River, southeast France : Contingent responses to external and internal controls |
| Arnaud et al. | 2015 | Historical geomorphic analysis (1932-2011) of a by-passed river reach in process-based restoration perspectives : The Old Rhine downstream of the Kembs diversion dam (France, Germany). |
| Clerici et al. | 2015 | Morphological changes of the floodplain reach of the Taro River (Northern Italy) in the last two centuries |
| Kremer et al. | 2015 | Changes in distal sedimentation regime of the Rhone delta system controlled by subaquatic channels (Lake Geneva, Switzerland/France) |
| Scorpio et al. | 2015 | River channel adjustments in Southern Italy over past 150 years and implications for channel recovery |

Table 1.2 : Exemples d'études sur le changement fluvial des cours d'eau européens publiées au cours des cinq dernières années.

Ces changements remontent généralement à la fin du XIX^e siècle ou au début du XX^e siècle et se sont nettement intensifiés à partir des années 1950. Ils reposent essentiellement sur deux processus dominants (Rinaldi et al., 2013 - Fig. 1.9) : 1) l'*incision* du chenal, *i.e.*,

l'abaissement du niveau du lit, provoquée par une force tractrice excessive par rapport à la charge alluviale disponible (Bravard, 1994 ; Simon et Darby, 1999) et 2) la *contraction* du chenal (*channel narrowing*), *i.e.*, la réduction de la largeur du chenal, de la bande active et/ou de l'espace de mobilité du chenal, liée à une stabilisation des berges et/ou à une réduction de la force tractrice (Kondolf, 1997 ; Surian, 1999).

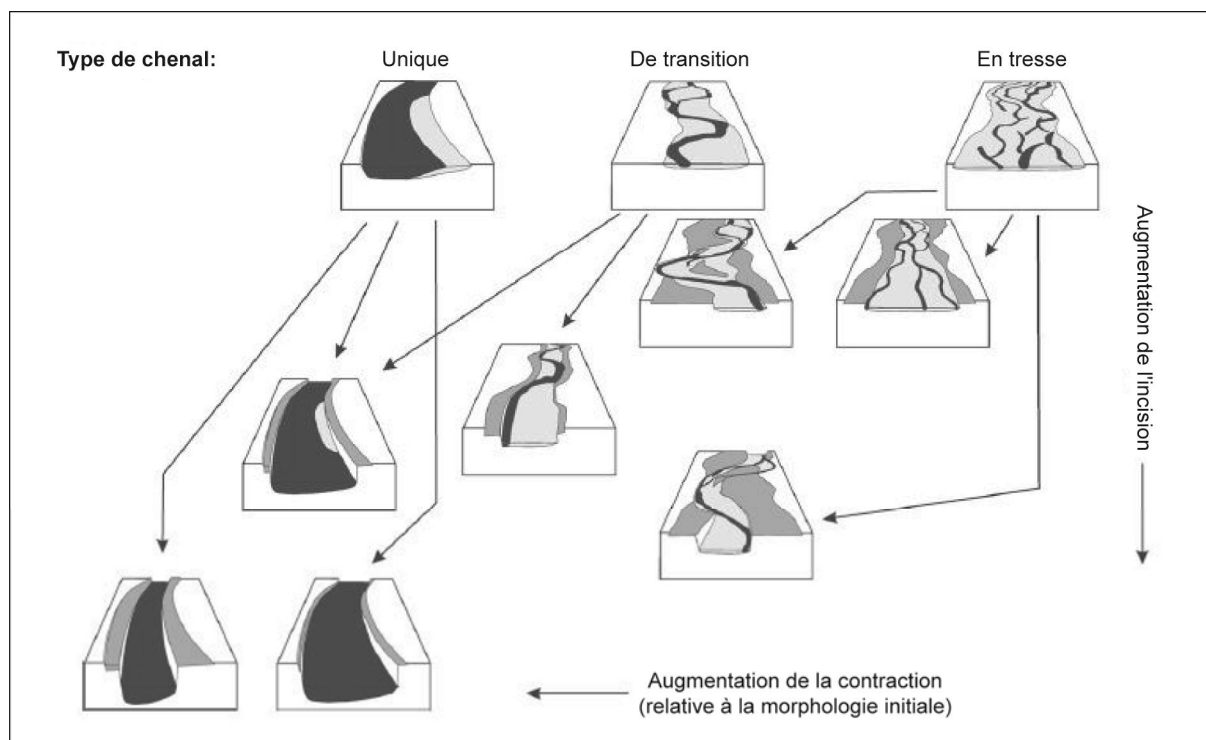


Figure 1.9 : Synthèse des principaux types d'ajustement observés sur les cours d'eau italiens au cours des 100 dernières années (modifié d'après Rinaldi et al., 2013 et Surian et Rinaldi, 2003). A partir de trois morphologies initiales, différents ajustements ont été observés selon différents degrés d'incision et de contraction.

1.3.3. La notion d'Anthropocène et les facteurs de contrôle de nature anthropique

Le concept d'*Anthropocène*, proposé dans les années 2000 par le néerlandais P.J. Crutzen (Crutzen et Stoermer, 2000 ; Crutzen, 2002), désigne la période actuelle, marquée par une forte augmentation de la pression des sociétés sur les milieux. La limite chronologique marquant le début de cette période est encore aujourd'hui discutée. Selon Steffen et al. (2011), 1800 représenterait le seuil à retenir, marqué par les effets de la révolution industrielle. Toutefois, le début de la phase dite de la *grande accélération* post seconde guerre mondiale, marquée par une intensification considérable des activités humaines (Fig. 1.10), pourrait aussi représenter une limite pertinente (Steffen et al., 2015).

Cette grande accélération a été identifiée comme le facteur clé de l'intensification des processus d'altération des cours d'eau au cours de la seconde moitié du XX^e siècle (Gregory, 2006). De nombreuses études ont ainsi abordé la question des *channel changes* dans une optique directe d'étude d'impact plutôt que de diagnostic géomorphologique (cf. titres des publications listées dans la Table 1.2). La liste des aménagements et usages représentant une perturbation directe ou indirecte pour les systèmes fluviaux s'avère particulièrement longue. Cinq grands types d'intervention peuvent toutefois être

individualisés (Gregory, 2006) : 1) la régulation des rivières par construction de barrages et de réservoirs ; 2) la chenalisation et la modification de tronçons fluviaux, notamment dans l'optique de la navigation ; 3) l'extension urbaine ; 4) les changements d'occupation du sol et 5) les transferts d'eau.

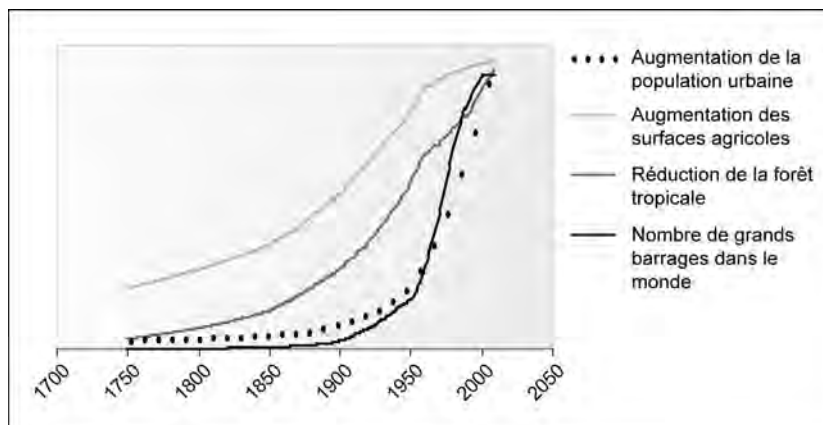


Figure 1.10 : Représentation de quatre indicateurs de la grande accélération (source : IGBP).

1.3.3.1. La régulation des rivières par construction de barrages et de réservoirs

La régulation des rivières par construction de barrages et de réservoirs peut provoquer des réponses très variées et complexes selon les caractéristiques du cours d'eau, des structures mises en place et des usages qui en sont faits (Petts, 1979 ; Williams et Wolman, 1984 ; Kondolf, 1997 ; Brandt, 2000 ; Grant et al., 2003 ; Petts et Gurnell, 2005 ; Graf, 2006 ; Rollet, 2007 ; Schmidt et Wilcock, 2008 ; Souchon et Nicolas, 2011 ; Grant, 2012 ; Arnaud, 2012).

La mise en place de barrages a d'abord un effet sur les flux d'eau, avec la formation d'un plan d'eau quasi-stagnante à l'amont du barrage et la réduction des pics de crue à l'aval, ainsi que l'intensification ou l'homogénéisation des étiages, selon les cas. Les barrages ont ensuite un effet direct sur le transfert sédimentaire, en agissant comme piège à sédiment et en réduisant la capacité de transport à l'entrée du réservoir, ainsi que dans les parties basses des affluents situés en amont. A l'aval immédiat du barrage, une modification de la pente est par ailleurs souvent observée, liée à une incision provoquée par le rejet des eaux du barrage faiblement chargées en sédiment. Cette variation de la pente s'accompagne généralement d'une réduction de la largeur du chenal, de la végétalisation des milieux annexes et d'une augmentation de la granulométrie de la charge de fond.

1.3.3.2. La chenalisation et la modification de tronçons fluviaux

"Le terme de chenalisation englobe tous les aménagements de rivière visant à accélérer l'écoulement par surdimensionnement et simplification de la géométrie des lits mineurs, et réduction de la rugosité, dans le but principal de réduire les inondations. Des ouvrages de stabilisation (seuils, digues) et des actions d'entretien du lit (curage, dragage, nettoyage de la végétation) accompagnent souvent ces interventions" (Wasson et al., 1995). Par l'augmentation des débits, ce type d'intervention provoque généralement une tendance à l'incision, l'érosion latérale étant limitée par les structures de protection des berges. La chenalisation peut par ailleurs provoquer une érosion régressive à l'amont, ainsi qu'une accentuation des crues et des dépôts sédimentaires à l'aval (Robbins et Simon, 1983 ; Brookes, 1988).

Les extractions de matériaux en lit mineur, liées à la démarche de chenalisation ou à l'exploitation de la ressource sédimentaire, provoquent par ailleurs un déficit généralisé en charge solide, et peuvent générer une modification localisée du chenal (fosses d'extractions) et des affouillements (Beaudelin, 1989 ; Landon et Piégay, 1994 ; Peiry et Nougier, 1994 ; Bravard et al., 1997).

1.3.3.3. L'extension urbaine

Outre la chenalisation des cours d'eau urbains, l'extension urbaine se caractérise par une augmentation des surfaces à capacité d'infiltration proche de zéro et augmente de cette manière les transferts d'eau vers le chenal (Wolman, 1967 ; Doyle et al., 2000 ; Booth, 1991 ; Bledsoe et Watson, 2001 ; Chin, 2006). La quantité d'eau ruisselée pour un événement pluviométrique donné est donc plus importante, ce qui conduit à des régimes de crues rapides, caractérisés par des ondes de crues courtes et des pics de crues marqués. Ce type de régime tend à générer des zones d'érosion et d'affouillement, ainsi qu'une accentuation des dépôts sédimentaires à l'aval de la zone urbanisée. L'impact global de ces transformations a été qualifié de *urban stream syndrom* (Walsh, 2005).

1.3.3.4. Les changements d'occupation du sol

Le changement d'occupation du sol peut de manière générale conduire à une évolution du style fluvial en raison d'une modification des taux d'érosion et de ruissellement. A la fin du XVIII^e siècle, la croissance démographique, notamment en France, a conduit à la déforestation des versants pour conquérir de nouvelles terres et répondre ainsi aux besoins alimentaires de la population croissante. La reforestation des versants, mise en oeuvre à la fin du XIX^e siècle dans une optique de conservation (restauration des terrains de montagne - RTM, à partir de 1860 ; Lilin, 1986 ; Combes, 1989), a réduit considérablement les taux d'érosion du sol et surtout le transfert de fines vers les chenaux (Landon et Piégay 1994 ; Peiry et Nougier, 1994 ; Bravard, 2001).

1.3.3.5. Les transferts d'eau

Les transferts d'eau pour l'irrigation ou autre usage humain, ont tendance à réduire la compétence des cours d'eau, impliquant une réduction de la force tractrice et par là même du transport sédimentaire. A l'inverse, les apports issus de drains ou de fossés d'évacuation génèrent ponctuellement une accentuation des transferts sédimentaires (Li et al., 2000 ; Karr et al., 2000).

1.3.4. Le changement climatique comme facteur additionnel

Dans le champ d'étude des paléoenvironnements, les perturbations liées aux changements climatiques représentent un facteur de contrôle dominant, mis en avant pour expliquer la métamorphose fluviale (Bravard et Magny, 2002).

Au cours des 1500 dernières années, trois périodes de variation globale des températures ont été identifiées (Le Roy Ladurie, 1967 ; Mann, 2002a, 2002b ; Mann et al., 2009 - Fig. 1.11) : 1) une phase relativement chaude dite Optimum Climatique Médiéval (OCM) ou Anomalie Climatique Médiévale (ACM, Xoplaki et al., 2011) du X^e au XIV^e siècle ; 2) une phase de refroidissement dite Petit Âge Glaciaire (PAG) de 1550 à 1850, qui a été

attribuée à une réduction du rayonnement solaire et à un épisode de forte activité volcanique (Grove, 1988 et 2006) et 3) la période actuelle de Réchauffement Global (RG) observée depuis le début du XX^e siècle (+ 0,85°C sur la courbe des températures mondiales moyennes depuis 1880 - IPCC, 2014), traduite par l'augmentation du niveau de la mer et localement par une accentuation des extrêmes de température et de précipitation. Cette dernière période a principalement été attribuée à une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère sous l'effet de l'intensification des activités humaines (IPCC, 2014).

Les études historiques et géomorphologiques ont révélé une métamorphose fluviale des cours d'eau alpins à la fin du XIV^e siècle, avec le passage d'un style à chenal unique à un style en tresse, qui a été associé à la transition OM/PAG (Bravard, 1989). Les effets possibles de l'évolution climatique actuelle, *i.e.* la transition PAG/RG, ont donc été envisagés comme facteur additionnel pour expliquer les changements observés à la fin du XIX^e siècle (Bravard, 1989 ; Rumsby et Macklin, 1996 ; Liébault et Piégay, 2002 ; Arnaud-Fassetta, 2003 ; Gob et al., 2008 ; Astrade et al., 2011 ; Carozza et al., 2012 ; Métivier et Barrier, 2012).

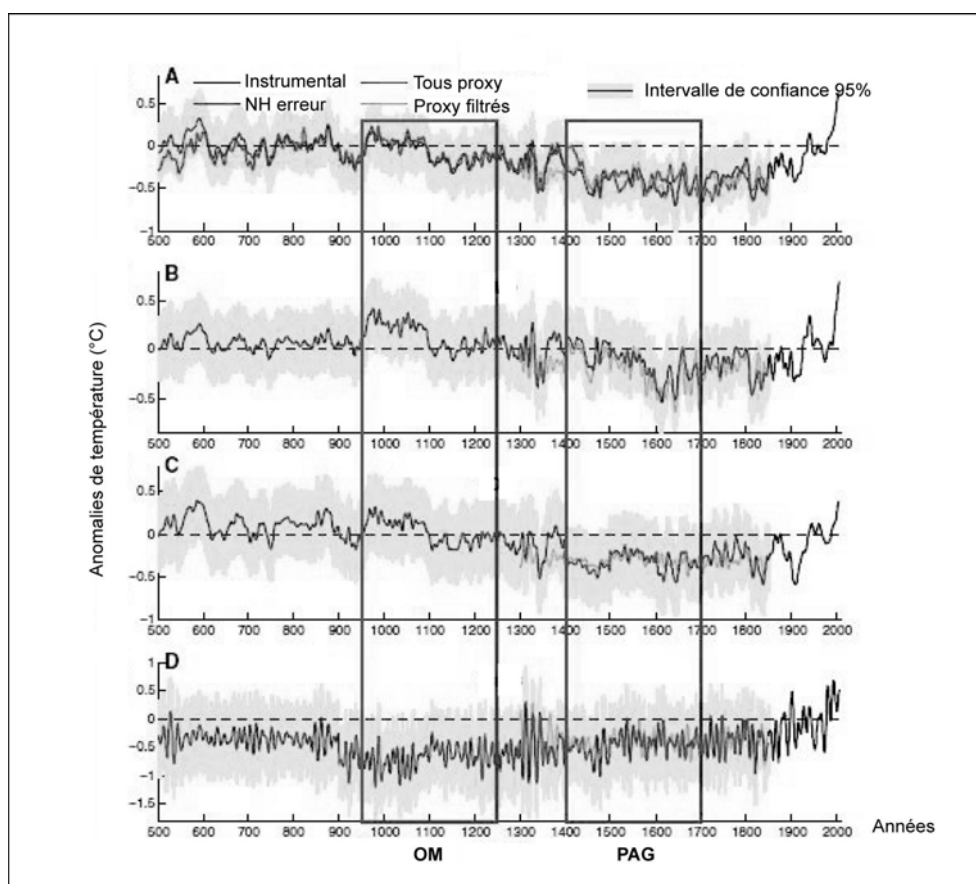


Figure 1.11 : Reconstruction des températures de surface au cours des 1500 dernières années (modifié d'après Mann et al., 2009). Les reconstructions de température ont été moyennées à l'échelle de A) l'ensemble de l'hémisphère nord (HN), B) la région nord atlantique, C) la région nord pacifique et D) la région Nino3. La zone grisée montre l'intervalle de confiance 95%. Les écarts montrant au mieux l'Optimum Climatique Médiéval (OCM) et le Petit Âge Glaciaire (PAG) dans l'hémisphère nord sont encadrés.

1.3.5. L'impact du changement sur les enjeux socio-environnementaux

Les deux phénomènes d'incision et de contraction des cours d'eau se sont traduits par des effets environnementaux et sociétaux dramatiques (Bravard et al., 1999 ; Rinaldi et al., 2013) :

- Mise en péril d'ouvrages du génie civil (Kondolf, 1997), avec *e.g.*, l'effondrement du pont Wilson à Tours en 1978, lié au déchaussement de plusieurs arches, qui a révélé en France l'impact des extractions intensives de granulat ;
- Augmentation de la granulométrie et colmatage de la charge de fond, voire mise à nu du substratum rocheux, conduisant à une altération de la zone hyporhéique et des habitats aquatiques, avec notamment 20% des espèces mondiales de poissons d'eau douce identifiées comme menacées, en danger d'extinction ou disparues au cours des dernières décennies (MEA, 2005) ;
- Abaissement du niveau de la nappe, réduisant la connexion hydrologique à la nappe et la fréquence d'inondation des zones riveraines, en partie responsable d'une perte de richesse et de diversité spécifiques des forêts alluviales (Dufour et Piégay, 2006 ; Schnitzler-Lenoble, 2007) ;
- Perturbation de la connectivité latérale entre le chenal et sa plaine alluviale, limitant le phénomène de *flood-pulse* et contribuant à la dégradation de la forêt alluviale et à la perte d'annexes fluviales représentant des habitats pour diverses espèces (Schnitzler-Lenoble, 2007).

A ces exemples d'altération des milieux causés par les phénomènes d'incision et de contraction des chenaux, s'ajoutent d'autres impacts anthropiques sur les hydrosystèmes fluviaux, tels que le déséquilibre des écosystèmes par la propagation d'espèces exotiques invasives, ou encore par la pollution des eaux liée aux rejets industriels, agricoles et urbains (MEA, 2005).

1.4. La réponse des sociétés au changement : l'ère de la restauration

Face au constat d'une dégradation des conditions environnementales, une volonté de restaurer les cours d'eau a progressivement émergé dans les années 1980, à l'échelle des pays occidentaux et notamment en Europe. Cette volonté est aujourd'hui largement assumée et mise en avant par le parlement européen, à travers la directive cadre sur l'eau (DCE, 2000). Elle motive en parallèle de nombreuses études scientifiques, qui ont mis en évidence l'intérêt d'une bonne connaissance de la trajectoire historique des systèmes à restaurer dans la réussite des démarches de restauration (Willis et al., 2006).

1.4.1. L'émergence d'une volonté de restaurer les cours d'eau (cadre législatif)

La première manifestation législative d'un souci de l'état des cours d'eau en France correspond à la loi sur l'eau de 1964 *relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution*. Cette loi, essentiellement centrée sur la disponibilité de la ressource en eau et sur la qualité de cette ressource, est à l'origine des agences de l'eau (établissements publics consacrés à la gestion de l'eau) et des comités de bassin (assemblées regroupant les acteurs publics et privés du domaine de l'eau, chargées de définir les grands axes de la politique de gestion de la ressource en eau - EauFrance). Dans les années 1990, des objectifs plus globaux ont été envisagés avec la loi sur l'eau de 1992, qui a introduit l'idée de préservation et de restauration des écosystèmes aquatiques et des zones humides, ainsi que la mise en place de schémas directeurs d'aménagement et de

gestion des eaux (SDAGE), complétés dans chaque sous-bassin par des schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE - EauFrance). Les évolutions législatives liées à la gestion des milieux aquatiques et humides en France, ont par la suite été directement dictées par les démarches mises en place à l'échelle européenne (Arnaud-Fassetta et al., 2013).

A l'échelle européenne, la directive cadre sur l'eau (DCE, 2000) a marqué un tournant dans les démarches de gestion et de protection des milieux aquatiques et humides, en établissant un cadre pour une politique globale communautaire de la gestion de l'eau (EauFrance). L'objectif ciblé était le bon état écologique des eaux européennes en 2015, impliquant la mise à contribution du public dans cette démarche. En 2009, un plan de gestion a ainsi été établi dans chaque district hydrographique (ensembles de bassins hydrographiques), définissant les objectifs à atteindre, ainsi qu'un programme d'actions à réaliser dans cette optique (mesures réglementaires, incitations financières et accords volontaires). En France, ces plans de gestion ont été intégrés dans les SDAGE adoptés fin 2009 pour la période 2010-2015. Au terme de ce premier cycle, de nouveaux SDAGE ont été définis pour la poursuite des objectifs de la DCE sur la période 2016-2021 (EauFrance).

La mise en oeuvre des orientations de la DCE passe notamment par la conception de projets de *restauration*, un concept récurrent dans les textes législatifs et réglementaires français (Morandi, 2014). Les démarches dites de restauration, amorcées dès les années 1980, notamment au Danemark et en Allemagne (Brookes, 1987 - cf. Piégay et al., 2008), se sont ainsi multipliées au cours de la dernière décennie. En 2011, déjà 480 références à des actions de restauration en France pouvaient ainsi être trouvées sur internet (Morandi et Piégay, 2011),

1.4.2. Les démarches entreprises au niveau opérationnel

La restauration hydromorphologique au sens stricte, consiste à agir sur la qualité des berges et du lit mineur, dans l'optique d'améliorer la qualité des habitats (Adam et al., 2007). Cette démarche implique des opérations très diverses, telles que, *e.g.*, (Adam et al., 2007) l'arasement de seuils, la reconstitution du matelas alluvial, la reconnexion d'annexes hydrauliques, la suppression de structures de protection des berges, ou encore la modification directe de la géométrie du lit mineur (*e.g.*, reméandrage).

Toutefois, la *restauration* est un concept particulièrement ambigu, qui est aujourd'hui largement utilisé dans les différentes sphères politiques, opérationnelles et scientifiques (Morandi, 2014). En 2011, Morandi et Piégay ont proposé un premier bilan des actions entreprises en France "*déclarées par les opérateurs, les élus ou les scientifiques comme relevant du domaine de la restauration de rivière*" et portant "*sur l'hydrosystème et non sur des infrastructures annexes*". Ce bilan a permis de mettre en évidence la diversité des démarches opérationnelles entendues sous le terme général de restauration, avec au total 23 mesures distinctes identifiées, regroupées en trois grands types (Table 1.3) : 1) les actions de restauration écologique (42%) ; 2) les actions de restauration piscicole (27%) et 3) les actions de restauration hydraulique (49%). Il ressort de cette étude une distinction encore floue entre la perception écologique inscrite dans une démarche de développement durable ordonnée par la DCE et la gestion locale du risque hydraulique. En conséquence, des démarches contradictoires sont souvent rassemblées sous la même appellation.

1. Restauration écologique

Relèvement des débits minimum

Diversification des écoulements

Recharge sédimentaire / rétablissement de la continuité sédimentaire

Remodelage du chenal (nouveau lit, lit d'étiage, banquettes submersibles, sinuosité, terrassements)

Reméandrage du chenal

Reconnexion / déconnexion / restauration d'annexe hydraulique

Restauration / reconstitution végétale de ripisylve (plantation, bouturage, lutte contre les espèces invasives, déboisement de plantations)

Restauration végétale du chenal (plantation d'hélophytes, roselières)

Suppression / aménagement / non restauration volontaire d'infrastructure (barrage, seuil, digues, palplanches, buses, couverture, plan d'eau)

Utilisation des sols (installation de clôtures, d'abreuvoirs à bétail, suppression de décharges, acquisitions foncières)

2. Restauration piscicole

Restauration / création de frayère annexe

Restauration de l'habitat par construction d'infrastructures (déflecteur, seuils, caches, blocs, troncs, rondins de bois)

Restauration / création de frayère dans le chenal

3. Restauration hydraulique

Gestion hydraulique

Stabilisation du profil en long par infrastructures (seuils, contre-seuils)

Curage du chenal

Gestion des atterrissements (suppression de la végétation, tranchée)

Protection de berges par génie végétal

Protection de berges en génie civil (mur en pierre sèche, gabion)

Entretien du chenal (suppression d'embacles)

Entretien de la ripisylve (débroussaillage, élagage, coupe sélective)

Table 1.3 : Classification des actions en fonction du type de restauration et des mesures mises en oeuvre (Morandi et Piégay, 2011)

1.4.3. La restauration en tant que concept

Il est aujourd'hui admis que cibler un état "naturel" passé du système comme objectif de restauration n'est pas la démarche la plus réaliste (Standford et al., 1996 ; Palmer et al., 2005), dans le sens que l'empreinte humaine est omniprésente et inscrite à long terme (Montgomery, 2008 ; Dufour et Piégay, 2009). Cibler la durabilité des milieux et la préservation des services écosystémiques représente un objectif plus rationnel au vu des contraintes environnementales et besoins humains (Dufour et Piégay, 2009). C'est pourquoi on différencie généralement deux concepts dominants (Morandi, 2014) : la *restauration* (Cairns, 1991 ; NRC, 1992) et la *réhabilitation* (Gore et Shields, 1995 ; Shields et al., 1997). *"Alors que la restauration apparaît comme un acte total de retour à la référence naturelle, la réhabilitation a une dimension partielle, justifiée par une forme de pragmatisme [...] quant à la prise en compte du facteur anthropique"* (Morandi, 2014). Malgré cette distinction, d'un

territoire à l'autre ou d'une sous-discipline à l'autre, certains termes et définitions sont préférés, conduisant à une définition toujours plurielle de la restauration au sens large (Morandi, 2014).

1.4.4. Pourquoi étudier la trajectoire historique d'un linéaire fluvial?

Bien que le retour à un état antérieur du système ne soit pas forcément souhaitable ni réalisable, la prise en compte de la dimension historique du système n'est jamais exclue de la démarche de restauration au sens large, puisque la connaissance de sa trajectoire d'évolution représente un prérequis jugé indispensable pour la mise en oeuvre d'interventions efficaces (Kondolf et Larson, 1995 ; Dufour et Piégay, 2009 ; Brierley et Fryirs, 2005 - Fig. 1.12). Une bonne connaissance de la trajectoire historique du système est notamment utile à trois niveaux (Kondolf et Larson, 1995) : 1) elle permet d'appréhender les processus lents qui agissent à long terme et ne sont pas perceptibles à l'échelle d'un cycle saisonnier, ainsi que les événements exceptionnels qui se caractérisent par des temps de retour importants ; 2) elle permet de faire la part entre différents facteurs de contrôle plus ou moins réversibles et 3) elle permet d'évaluer le potentiel d'ajustement / de récupération du système, afin de définir des objectifs de restauration réalistes et de planifier des actions adaptées, e.g., un système sensible à l'ajustement nécessitera relativement peu d'interventions pour amorcer une amélioration écologique alors qu'un système plus résilient nécessitera une intervention plus active (Brookes, 1992). Ce dernier point est essentiel dans notre perspective.

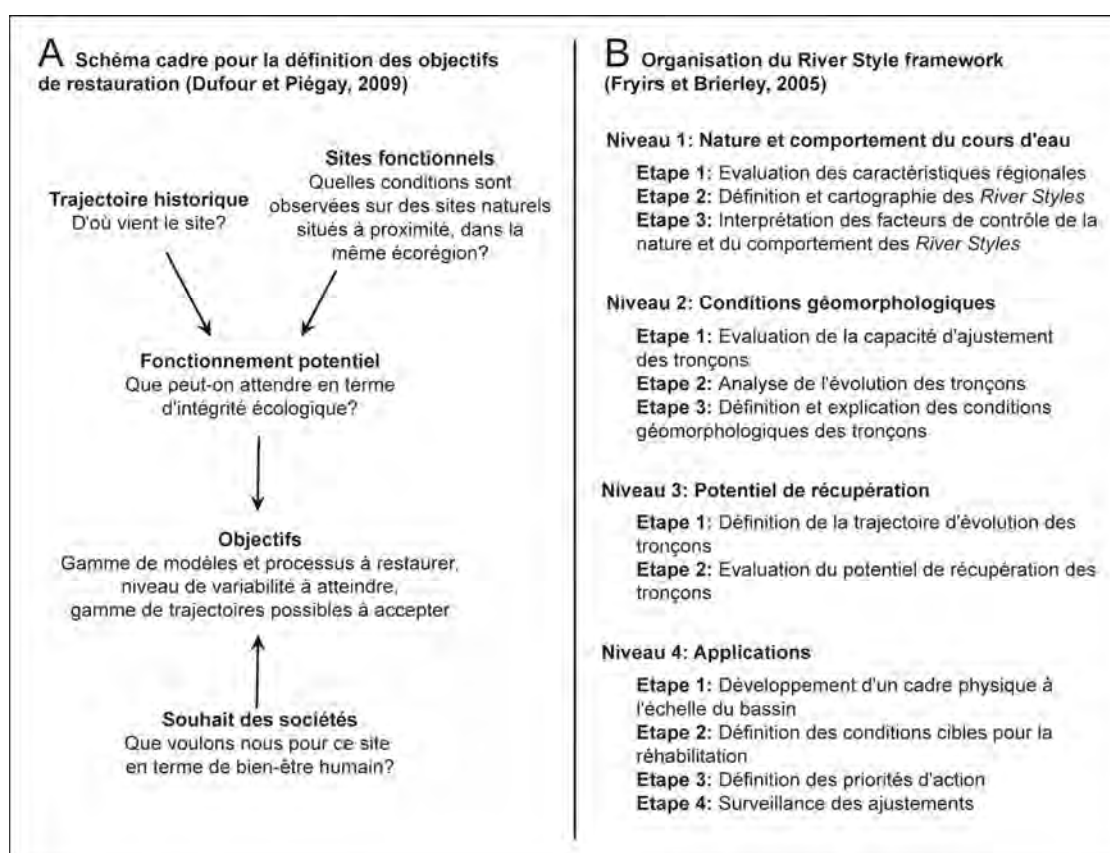


Figure 1.12 : Implication de la trajectoire historique dans les démarches de restauration. A - Schéma cadre pour la définition d'objectifs de restauration (modifié d'après Dufour et Piégay, 2009). B - Organisation du cadre d'action *River Style* pour la restauration des cours d'eau (Brierley et Fryirs, 2005).

1.5. Conclusion du chapitre 1

Les travaux antérieurs sur les cours d'eau et sur les écosystèmes associés ont révélé la grande complexité de ces systèmes environnementaux, aujourd'hui exprimée par les concepts de *système fluvial*, *hydrosystème fluvial* ou encore *anthroposystème*.

Ces systèmes se caractérisent par une grande diversité morphologique et comportementale des chenaux, liée à la variété des conditions du milieu d'écoulement (notamment géologiques et climatiques). Au sein d'un même bassin versant, un gradient morphologique est observé d'amont en aval et une diversité morphologique particulièrement forte est observée dans les secteurs de plaine alluviale, caractérisés par une forte mobilité latérale. Cette mosaïque de milieux génère une richesse et une diversité spécifiques particulièrement fortes.

En Europe et plus largement à l'échelle planétaire, la plupart des hydrosystèmes fluviaux représentent aujourd'hui des milieux menacés. Outre l'altération directe des écosystèmes par différents phénomènes de nature anthropique, tels que l'extension urbaine ou la propagation d'espèces invasives, une altération du fonctionnement hydro-sédimentaire des cours d'eau a été identifiée (*changement fluvial*) depuis plusieurs décennies. Ce phénomène se traduit principalement par une incision et une contraction des lits fluviaux, qui s'accompagne d'une série d'impacts sur les écosystèmes environnants. En résulte une atteinte aux services écosystémiques (bénéfices que l'homme tire des écosystèmes), avec notamment une perte de biodiversité considérable. La forte intensification des activités humaines qui a marqué la seconde moitié du XX^e siècle (*grande accélération*) a été identifiée comme le facteur de contrôle dominant de ce phénomène. Par ailleurs, des actions anthropiques antérieures, ainsi que la transition climatique entre le Petit Âge Glaciaire (PAG) et le Réchauffement Global (RG) à la fin du XIX^e siècle / au début du XX^e siècle, ont été perçus comme des facteurs additionnels.

Devant le constat d'une atteinte aux services écosystémiques, différentes démarches de restauration des cours d'eau ont été entreprises depuis les années 1980, qui sont aujourd'hui vivement encouragées par la directive européenne cadre sur l'eau (DCE, 2000). Différents types d'opération sont ainsi mis en œuvre, visant à réparer le mal causé en agissant notamment sur la morphologie des berges et du lit pour améliorer la qualité des habitats (restauration hydromorphologique). Dans ce cadre, la connaissance de la trajectoire historique des cours d'eau représente un prérequis indispensable.

Chapitre 2. - Cadre physique : conditions limites et dynamique fluviale de la Garonne toulousaine

Avant d'en venir à la problématique de recherche qui motive ce travail, il importe de localiser et délimiter notre secteur d'étude (Fig. 2.1), ainsi que de définir les caractéristiques qui lui sont propres. Dans cette optique, ce chapitre aborde d'abord les conditions globales du milieu par le biais d'une présentation détaillée du bassin versant de la Garonne (1), puis les caractéristiques hydromorphologiques propres à la *Garonne toulousaine*, un linéaire fluvial de 90 km de longueur, qui s'écoule en secteur de plaine (2).

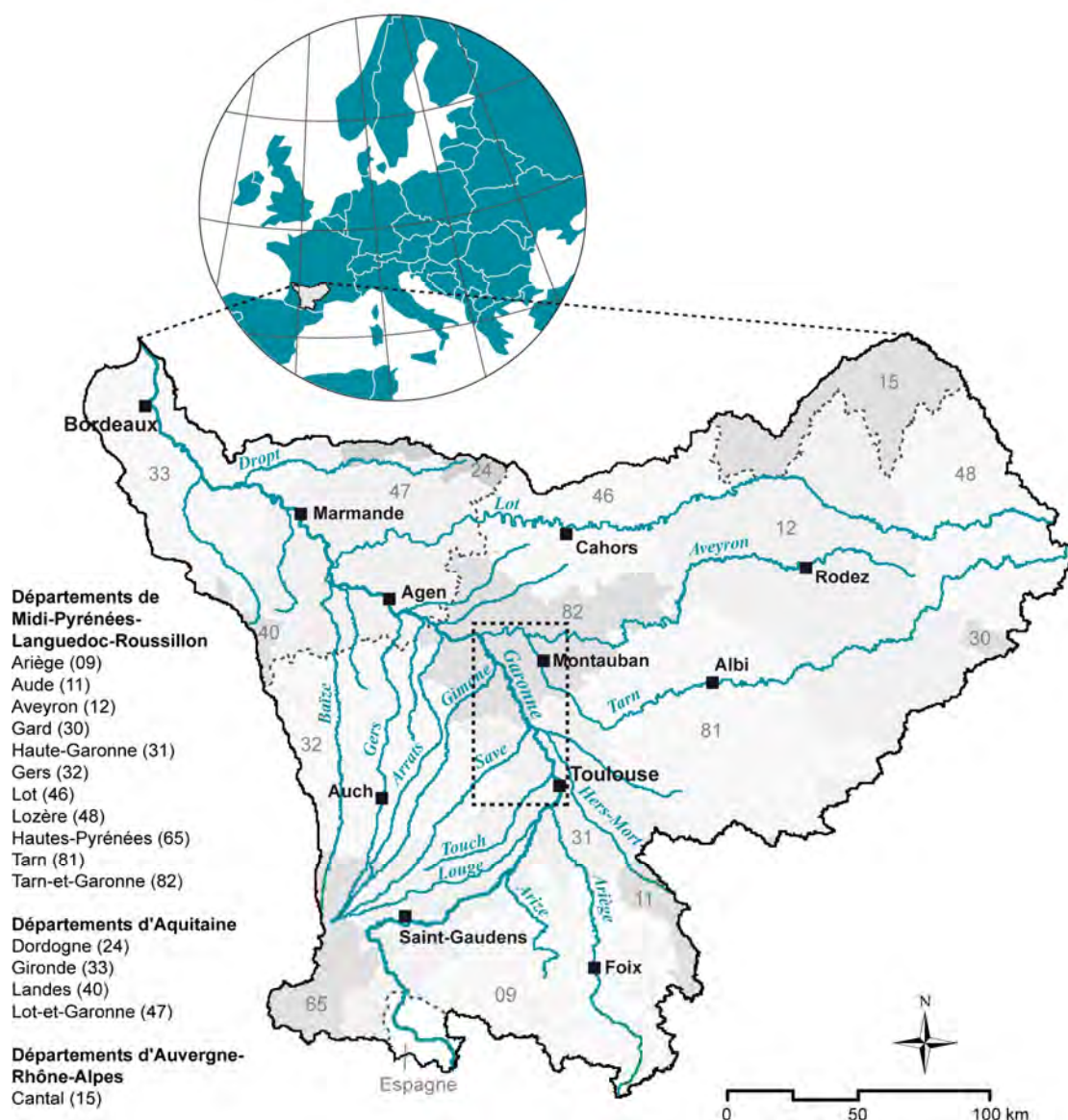


Figure 2.1 : Localisation et délimitation du bassin versant de la Garonne et du linéaire fluvial étudié, *i.e.*, la Garonne toulousaine (encadré - Source : Sandre, BD CARTHAGE® ; IGN, GEOFLA®).

2.1. Organisation morphostructurale, hydrographique, hydrologique et hydro-morphologique du bassin versant de la Garonne

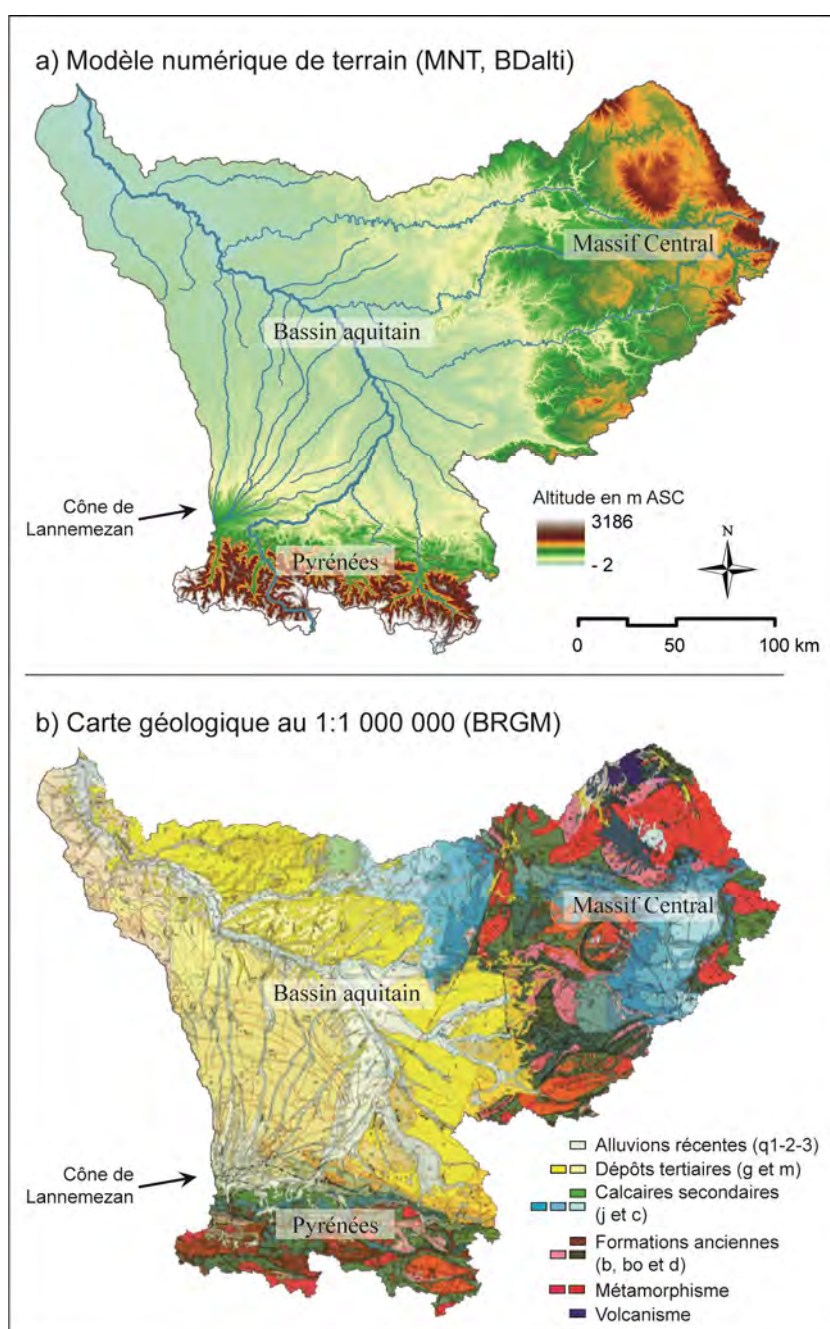
L'organisation du réseau hydrographique et les caractéristiques hydro-morphologiques de la Garonne sont contraintes par la position de son bassin versant, à la croisée entre trois grandes unités morphostructurales du sud-ouest de la France et plusieurs influences climatiques contrastées.

2.1.1. Organisation morphostructurale

Le bassin versant de la Garonne (56000 km²) traverse trois grandes unités morphostructurales du sud-ouest de la France (Fig. 2.2). Sa zone amont s'étend d'abord sur deux ensembles montagnards distincts : les Pyrénées centrales (franco-espagnoles) et le sud-ouest du Massif Central. Les zones médiane et aval traversent ensuite l'un des principaux bassins sédimentaires français : le Bassin aquitain.

Les Pyrénées occupent la partie méridionale du bassin versant et couvrent environ 10% de sa surface. Le gradient vertical y est important, avec des altitudes comprises entre 130 et 3186 m, qui génèrent des pentes fortes. La lithologie y est complexe, évoluant de terrains primaires dans la zone axiale de la chaîne pyrénéenne, vers des dépôts récents essentiellement fluviaux dans la zone de piémont, en passant par des terrains calcaires secondaires et tertiaires (Fischer, 1932).

Figure 2.2 : Organisation morphostructurale du bassin versant de la Garonne mise en évidence par la topographie (a) et la lithologie (b - Sources : IGN, BD ALTI® 75 m ; BRGM, 1:250000).



Le Massif Central occupe la partie orientale du bassin versant et couvre une surface plus importante (environ 30% de la surface totale du bassin). Ce relief est toutefois marqué par des altitudes nettement plus faibles, ne dépassant pas 1806 m, et par des pentes plus douces. Le réseau hydrographique y draine essentiellement les hauts plateaux calcaires et dolomitiques des causses, ainsi que divers plateaux schisteux et granitiques (Mercier, 2013).

Le Bassin aquitain se retrouve enfin dans les parties centrale et occidentale du bassin versant et s'ouvre sur l'océan atlantique. Cette unité morphostructurale se compose de dépôts oligocènes et miocènes en surface, principalement molassiques, et est marquée par des paysages de vallées, bas plateaux et collines aux pentes douces. Un éventail de vallées divergentes souligne la topographie plus contrastée du cône de Lannemezan en rive gauche de la Garonne (Mercier, 2013).

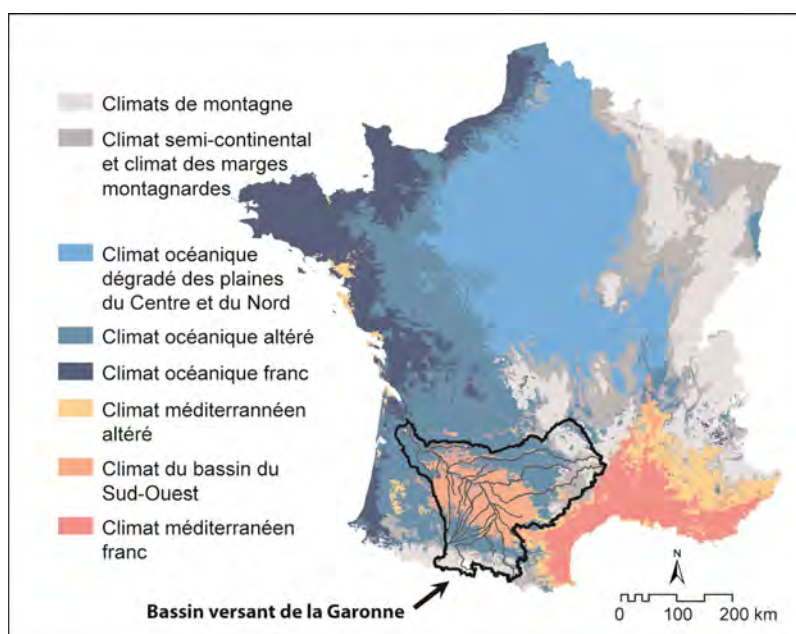
2.1.2. Réseau hydrographique

L'organisation morphostructurale du bassin versant de la Garonne conditionne son réseau hydrographique, lui ordonnant une forme en entonnoir (concentration des affluents dans le haut bassin - Figs. 2.1 et 2.2). L'écoulement de dernier ordre, *i.e.*, la Garonne, s'écoule des Pyrénées jusqu'à l'océan atlantique sur une longueur totale de 647 km et est principalement contraint par le cône de Lannemezan. Il suit ainsi une orientation SO-NE du piémont des Pyrénées jusqu'à la confluence de l'Ariège à Toulouse-Portet, après laquelle il bifurque vers le N-NO et finit par suivre une direction SE-NO après la confluence du Tarn. Les affluents de rive gauche issus des Pyrénées sont essentiellement des petits cours d'eau organisés sur les cônes (Baïze, Gers, Gimone, Save, etc.). A l'exception des affluents pyrénéens du haut bassin (*e.g.*, Ariège), les affluents de rive droite sont majoritairement issus du Massif Central et représentent souvent les apports les plus importants, qui modifient le régime de la Garonne (*e.g.*, Tarn et Lot).

2.1.3. Contexte hydro-climatique

Le bassin versant de la Garonne est principalement concerné par un climat océanique, caractérisé par des hivers doux et pluvieux et des étés frais et relativement humides (Pardé, 1928 ; Escourrou, 1982). Toutefois, sa position implique des influences climatiques additionnelles (Fig. 2.3), qui confèrent à la Garonne un régime de crue pluvio-nival complexe (Pardé, 1928).

Figure 2.3 : Typologie climatique du territoire français en 8 classes (modifié d'après Joly et al., 2010 - Source : Base de données climatiques communales 2009. THEMA Université de Franche-Comté, CNRS UMR6049 (F-25000 Besançon) /CESAER INRA UMR1041 (F-21000 Dijon) ; d'après Météo France 1971-2000).



Au sein de la tendance océanique dominante, Joly et al. (2010) distinguent d'abord un climat dit *du bassin du Sud-Ouest* dans la partie centrale du bassin, caractérisé par des températures annuelles moyennes plus élevées ($> 13^{\circ}$) et des précipitations moins importantes (< 800 mm en cumul annuel) que sur les marges du bassin, où le climat est dit océanique altéré (Fig. 2.3).

L'organisation morphostructurale et hydrographique du bassin implique ensuite la présence d'influences montagnardes au niveau de la chaîne pyrénéenne et du Massif Central (Fig. 2.3). Cette tendance localisée se caractérise par des hivers plus froids et des précipitations plus abondantes, notamment sous forme neigeuse.

Certains affluents de rive droite issus du Massif central, comme le Lot et le Tarn, peuvent par ailleurs être concernés par des influences méditerranéennes (Fig. 2.3), qui impliquent des températures plus élevées, une période de sécheresse estivale et des précipitations concentrées en automne, souvent sous forme d'événements violents de type cévenol.

2.1.4. Typologie hydromorphologique

La dynamique hydromorphologique de la Garonne évolue de l'amont vers l'aval en liaison avec la diminution du gradient torrentiel et l'augmentation des influences atlantiques (Defontaine, 1932 ; Lambert, 1989 ; Mergoil, 1993 ; Valette, 2002 - Fig. 2.4).

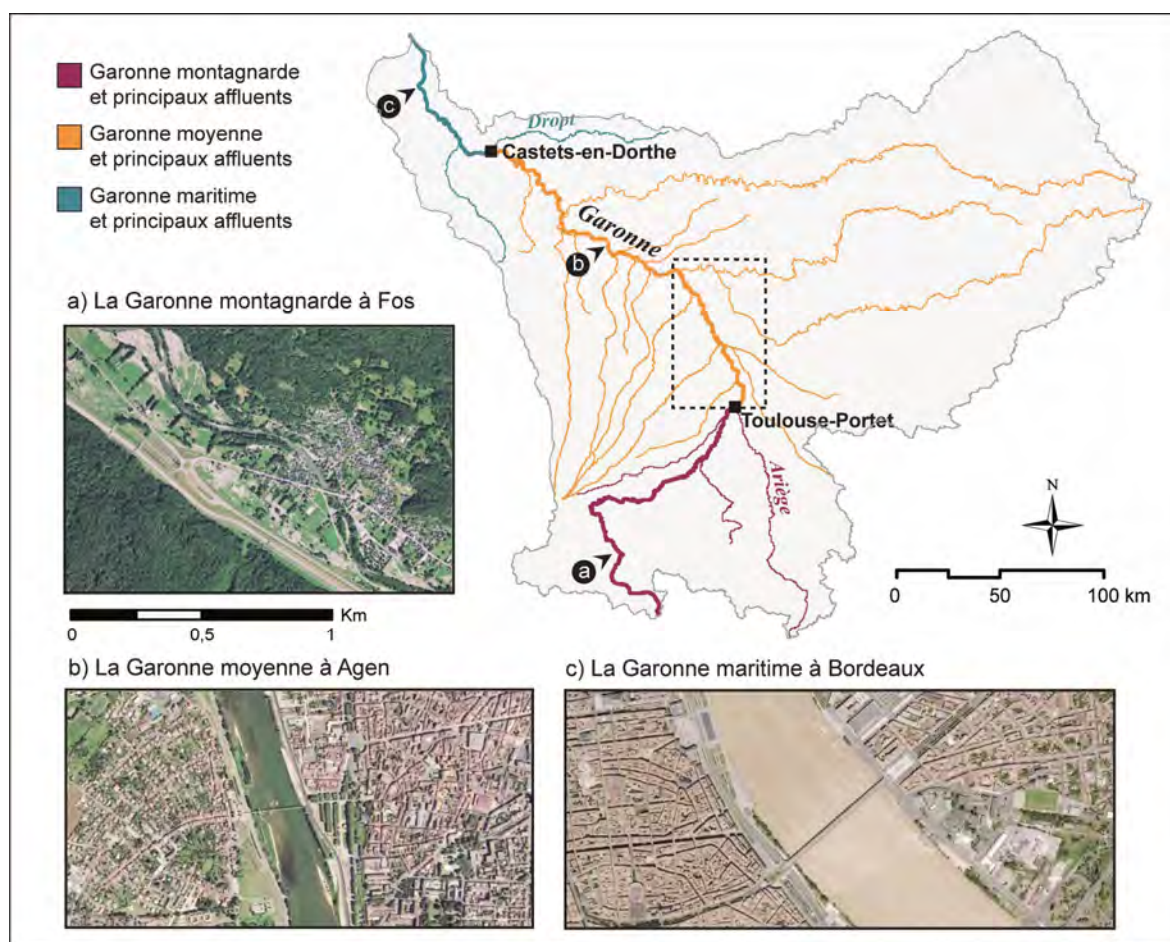


Figure 2.4 : Typologie hydromorphologique de la Garonne (l'encadré délimite la Garonne toulousaine - Source : Géoportail).

Une division en trois zones est couramment retenue et employée (Fig. 2.4) :

- La Garonne *montagnarde* correspond à la partie amont du bassin versant jusqu'à la confluence de l'Ariège à Toulouse-Portet, alimentée par des affluents pyrénéens. Elle est marquée par une pente forte et un chenal confiné instable (Fig. 2.4-a).
- La Garonne *moyenne*, entre Toulouse et la confluence du Dropt à Castets-en-Dorthe, se caractérise par une vallée plus large et un chenal instable moins confiné (Fig. 2.4-b).
- La Garonne *maritime*, à l'aval de Castets-en-Dorthe, correspond à la partie du fleuve sous influence de la dynamique de la marée (Fig. 2.4-c), qui forme l'estuaire de la Gironde (75 km de longueur), après sa confluence avec la Dordogne.

2.2. Fonctionnement hydro-sédimentaire de la Garonne toulousaine

Au sein de la Garonne moyenne, la portion étudiée, dite *Garonne toulousaine* (Valette, 2002) correspond à un linéaire de 90 km de longueur, compris entre la confluence de l'Ariège à Toulouse-Portet et la confluence du Tarn à Moissac (Fig. 2.5). Ce linéaire, situé au pied de la chaîne pyrénéenne, draine 27% de la surface totale du bassin versant de la Garonne (>15200 km²) et s'individualise par son homogénéité d'un point de vue géomorphologique et hydrologique.

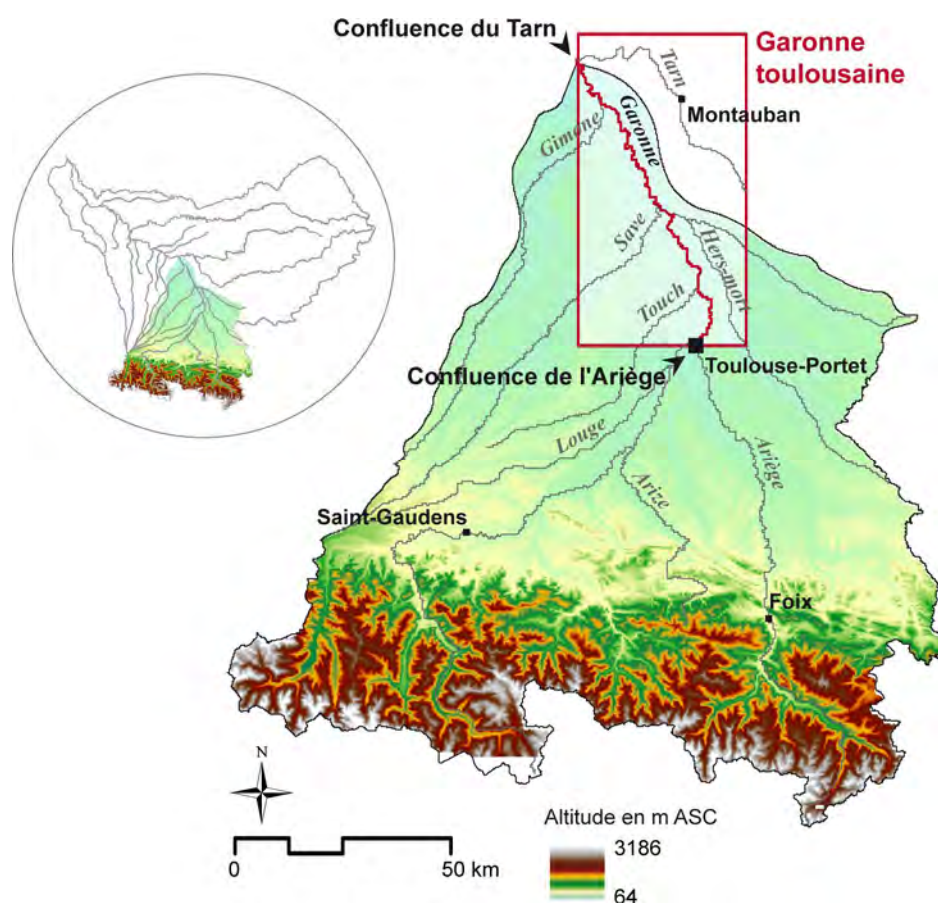


Figure 2.5 : Délimitation de la Garonne toulousaine et de son bassin versant (Source : IGN, BD ALTI® 75 m).

2.2.1. Structure et organisation de la plaine alluviale

La Garonne toulousaine s'écoule du S-SE vers le N-NO au sein d'une basse plaine pléistocène final à holocène (niveaux Fz 2-3 de la carte géologique - Carozza et al., 2013), encaissée dans un système de terrasses pléistocènes étagées (niveaux Fy, Fx, Fw, Fv et Fs de la carte géologique - Fig. 2.6). Au sein de cette plaine, le chenal s'écoule préférentiellement le long du talus de terrasse rive gauche, entaillé par les principaux affluents (Touch, Save et Gimone). Seul l'Hers-mort rejoint la rive droite de la Garonne, au niveau de Grenade.

A l'aval immédiat de Toulouse, la basse plaine de la Garonne se confond avec celle de l'Hers (Fig. 2.6 - profil a). Sa largeur varie en réalité entre 2 et plus de 4 km le long du linéaire et elle devient maximale à la jonction entre les vallées de la Garonne et de l'Hers-mort (Fig. 2.6 - profil b). Cette basse plaine n'est totalement inondée que par les crues exceptionnelles, telle que la crue du 23 Juin 1875 (plus hautes eaux connues). Les crues décennales inondent un sous-niveau dit *bassure* (Deffontaines, 1932), qui correspond globalement à des dépôts plus récents (Fz 1-2 de la carte géologique - Fig. 2.6) et qui garde l'empreinte morphologique des ajustements latéraux du chenal l'ayant façonnée (Lambert, 1988). Cette zone compte encore aujourd'hui de nombreux bras morts plus ou moins marqués dans la topographie de surface.

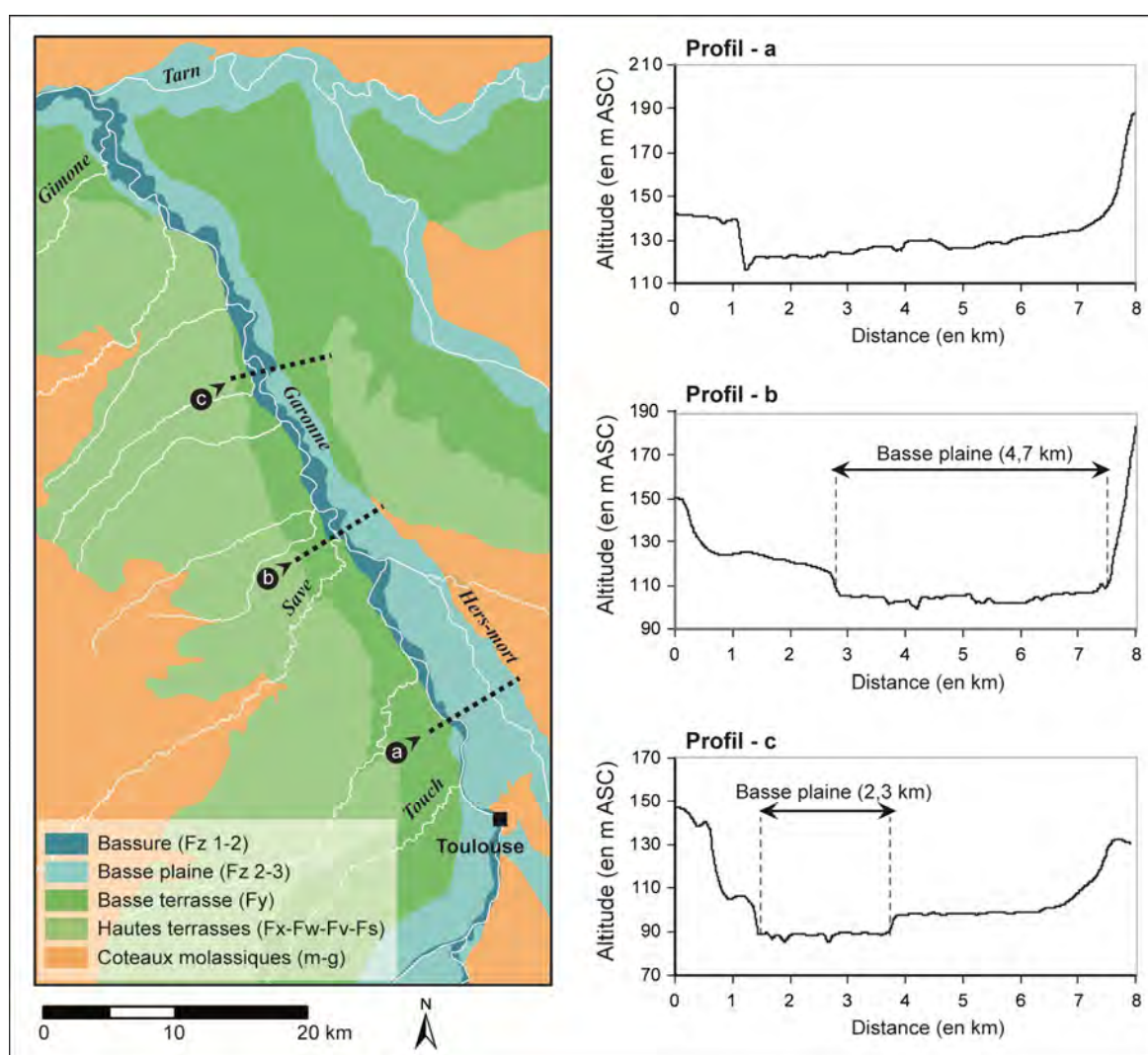


Figure 2.6 : Carte géomorphologique de la vallée de la Garonne toulousaine (Source : BRGM).

La Garonne toulousaine traverse 26 communes réparties entre les départements de la Haute-Garonne (31) et du Tarn-et-Garonne (82 - Fig. 2.7). Elle est par ailleurs longée depuis 1856 par le prolongement du canal du Midi, dit *canal latéral à la Garonne*. Le canal et les communes sont préférentiellement installés sur les terrasses. La basse plaine compte ainsi relativement peu d'habitats et est essentiellement consacrée à l'agriculture. Au sein de cette plaine, la basse, inondée de manière saisonnière, est principalement consacrée à la culture du peuplier.

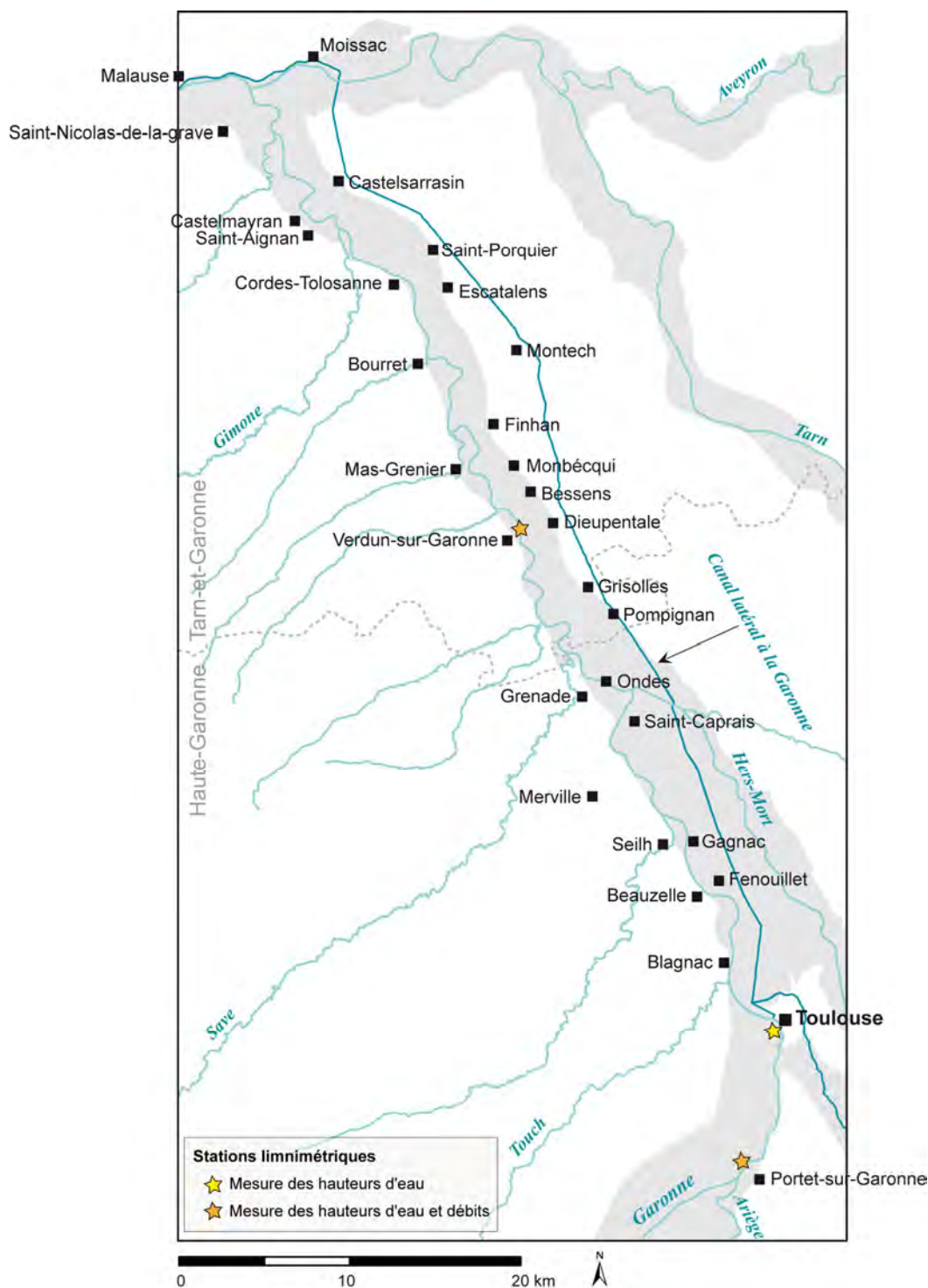


Figure 2.7 : Localisation des communes dans la plaine de la Garonne toulousaine (Source : IGN, Scan25® ; BD CARTHAGE®).

2.2.2. Morphologie du chenal

Le chenal de la Garonne présente un tracé sinueux à méandriforme (indice de sinuosité : 1,3 - Fig. 2.7 et Table 2.1) et se caractérise par une puissance spécifique estimée entre 60 et 75 W/m² (Steiger et Corenblit, 2000 ; Steiger et al., 2000), qui indique un fort potentiel de migration latérale (Ferguson, 1981 ; Brookes, 1990).

La pente, relativement forte pour un secteur de plaine (0,0009 m/m en moyenne), diminue entre Toulouse et la confluence du Tarn, en même temps que la forme du profil longitudinal évolue. Trois zones peuvent être distinguées (Steiger et al., 2000 ; Fig. 2.8) : 1) la portion comprise entre Toulouse et Beauzelle présente un profil convexe et une pente forte (0,0010 m/m) ; 2) de Beauzelle à Verdun-sur-Garonne, le profil devient concave et la pente s'adoucit (0,0009 m/m) et 3) de Verdun-sur-Garonne à Malause, le profil devient tendu, alors que la pente s'adoucit encore (0,0008 m/m).

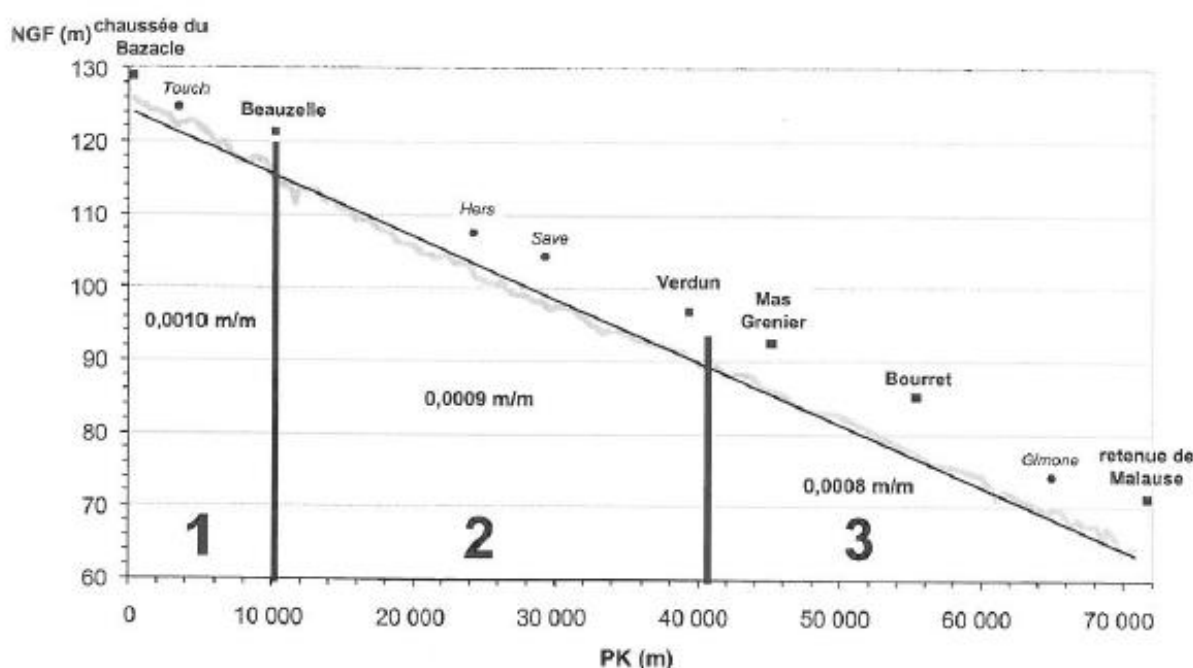


Figure 2.8 : Profil longitudinal de la Garonne toulousaine (Steiger et al., 1998). La numérotation correspond à la typologie des formes du profil. Les principaux affluents et localités sont situés le long du linéaire.

Le lit mineur présente une largeur moyenne de 150 m pour une profondeur moyenne de 4 m. La partie aval du linéaire fait toutefois exception, étant aujourd'hui submergée par la retenue d'eau de Malause (Fig. 2.9-a), qui alimente la centrale nucléaire de Golfech située quelques kilomètres à l'aval.

Contrairement au lit de la Garonne montagnarde, qui peut être considéré comme alluvial (11,7 m observés en 1981, 85 km en amont de Toulouse - InfoTerre : dossier du sous-sol 10547X0086/S), le fond du chenal en Garonne toulousaine se caractérise principalement par des affleurements de substratum molassique miocène et s'apparente à un *bedrock channel* (Table 2.1 et Fig. 2.9-c). La charge alluviale grossière y est résiduelle et ne couvre que 50% du linéaire (Delmouly et al., 2007).

Les berges sont stabilisées par des digues de terre revêtues de dalles de béton à l'amont et à l'aval du centre toulousain (Fig. 2.9-d) et par des enrochements dans la partie tarn-et-garonnaise (Fig. 2.9-b), ce qui limite fortement la mobilité latérale du chenal. La portion

haute-garonnaise, comprise entre Toulouse et Verdun-sur-Garonne (~35 km) se caractérise toutefois par des berges relativement naturelles, ayant seulement fait l'objet d'aménagements ponctuels.

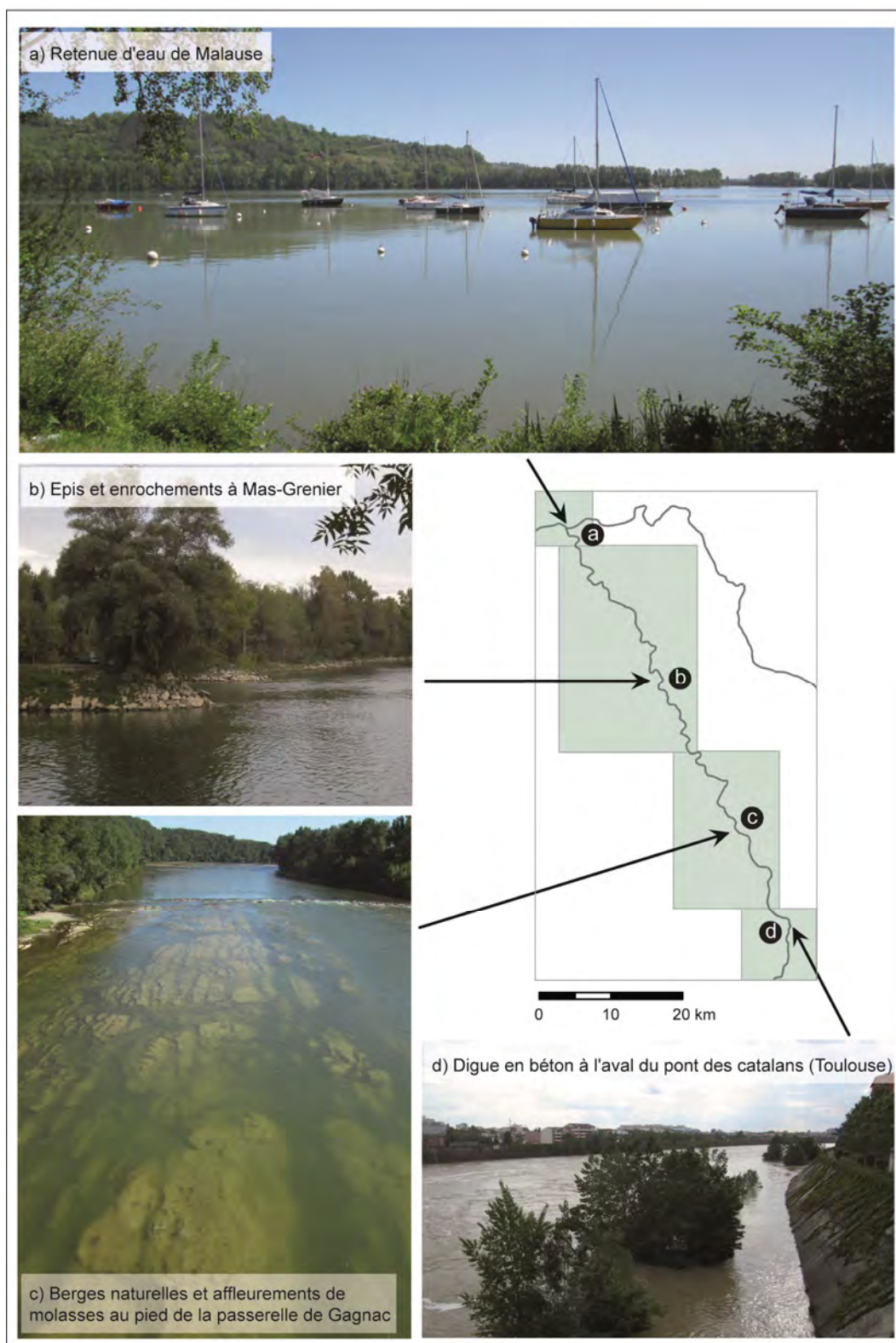


Figure 2.9 : Etat des berges et du fond le long de la Garonne toulousaine (photographies M. David). NB : l'image (c) montre la Garonne en période de basses eaux, alors que l'image (d) montre la Garonne en crue.

| Indices géomorphologiques | Valeurs | Références |
|------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| L (km) | 93 | IGN, Scan25® |
| SI | 1,31 | IGN, Scan25® |
| (W/m^2) | [60-75] | Steiger and Corenblit, 2000 |
| p_m (m/km) | 0,9, i.e., 0,09% ou 0,052° | Steiger and Corenblit, 2000 |
| l_m (m) | 150 | Steiger and Corenblit, 2000 |
| z_m (m) | 4 | Steiger and Corenblit, 2000 |
| Couverture alluviale (%) | 50 | Delmouly et al., 2007 |
| MES_m en période d'étiage (mg/l) | 5 | Mamoudou, 2008 |
| MES_m en période de crue (mg/l) | 160 | Mamoudou, 2008 |

Table 2.1 : Synthèse des caractéristiques géomorphologiques de la Garonne toulousaine. L : longueur du linéaire ; SI : indice de sinuosité ; : puissance spécifique ; p_m : pente moyenne ; l_m : largeur moyenne du chenal ; z_m : profondeur moyenne du chenal ; MES_m : teneur moyenne en matière en suspension.

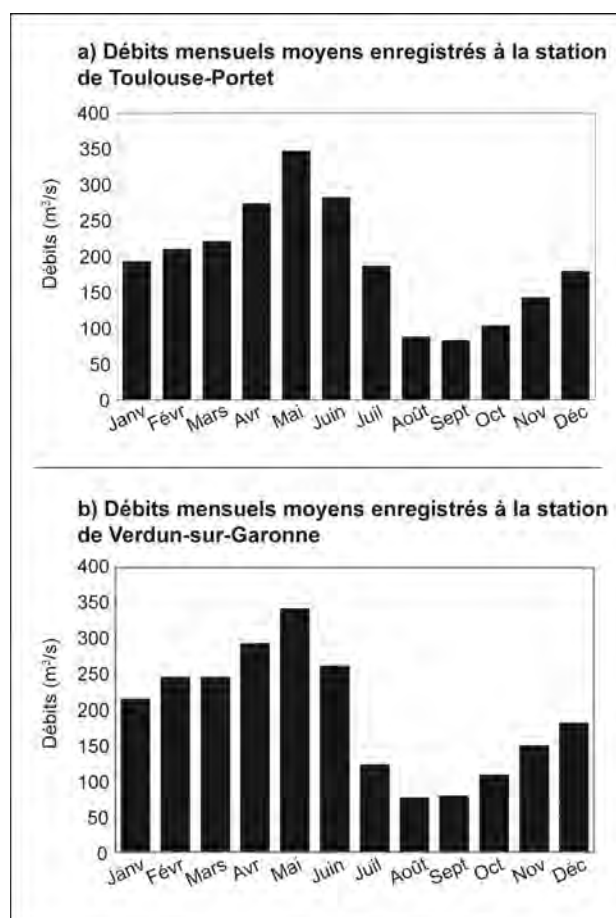
2.2.3. Régime hydrologique

Trois stations de mesure fournissent des données hydrologiques concernant le linéaire fluvial compris entre Toulouse et la confluence du Tarn (Fig. 2.7 et Table 2.2 - HYDRO) : la station de Toulouse-Portet (bassin versant de 9980 km²), la station de Toulouse-Pont-neuf (bassin versant légèrement supérieur) et la station de Verdun-sur-Garonne (bassin versant de 13730 km²).

Les débits sont disponibles depuis 1910 pour la station de Toulouse-Portet et depuis 1972 pour la station de Verdun-sur-Garonne). Aucun débit n'est disponible pour la station de Toulouse-Pont-neuf mais les hauteurs d'eau sont enregistrées depuis 1855. Dans le cas des deux premières stations, les mesures de hauteur d'eau disponibles ne remontent qu'aux années 1980.

Les deux stations Toulouse-Portet et Verdun-sur-Garonne affichent un module respectif de 188 et 193 m³/s, calculé sur 107 ans pour la première et 45 ans pour la seconde. Ce débit augmente de 200% après la confluence avec le Tarn, alors que la contribution des affluents compris entre Toulouse et la confluence du Tarn (Touch, Save, Hers et Gimone) reste très réduite, exceptée en cas d' événement pluvieux localisé.

Figure 2.10 : Débits mensuels moyens enregistrés aux stations de Toulouse-Portet et Verdun-sur-Garonne (Source : HYDRO).



Une période sèche est marquée de Juillet à Décembre avec un débit moyen d'environ 77 à 87 m³/s en Août et en Septembre (Fig. 2.10). A cette période, les étiages peuvent être sévères et laissent apparaître de grands affleurements du substratum molassique dans le chenal (Fig. 2.9-c). La période de hautes eaux s'étend de Janvier à Juin, avec des valeurs maximales en Mai, de 345 m³/s en moyenne (Fig. 2.10). C'est à cette période que la plupart des crues ont lieu, bien que des crues d'hiver soient aussi régulièrement enregistrées. A la station de Toulouse-Portet (HYDRO ; Table x), les crues quinquennales (Q_5) atteignent des débits de l'ordre de 2200 m³/s ; les crues vicennales (Q_{20}) atteignent des débits de l'ordre de 3100 m³/s ; les crues cinquantennales (Q_{50}) atteignent des débits de l'ordre de 3600 m³/s et la crue centennale (Q_{100} ; 23 Juin 1875) a atteint un débit estimé à 7000 m³/s (SMEPAG, 1989).

| Indices hydrologiques | Stations de mesure | | | References |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------|--------------|
| | Toulouse-Portet | Verdun-sur-Garonne | Lamagistère* | |
| Période de mesure (années) | 107 | 45 | 50 | HYDRO |
| Bassin versant (km ²) | 9980 | 13730 | 32350 | HYDRO |
| Q_m (m ³ /s) | 188 | 193 | 394 | HYDRO |
| Q_{min} (m ³ /s) | 65 | 58 | 104 | HYDRO |
| Q_5 (m ³ /s) | 2200 | 2700 | 3700 | HYDRO |
| Q_{20} (m ³ /s) | 3100 | 3700 | 5000 | HYDRO |
| Q_{50} (m ³ /s) | 3600 | 4400 | 5800 | HYDRO |
| Q_{100} (m ³ /s) | 7000 | - | - | SMEPAG, 1989 |

*station située 16 km à l'aval de la confluence du Tarn

Table 2.2 : Synthèse des caractéristiques hydrologiques de la Garonne toulousaine. Q_m : module ; Q_{min} : débit mensuel minimal d'une année hydrologique, calculé à partir des débits moyens mensuels ; Q_5 : débit instantané maximal à fréquence quinquennale ; Q_{20} : débit instantané maximal à fréquence vicennale ; Q_{50} : débit instantané maximal à fréquence cinquantennale ; Q_{100} : débit instantané maximal à fréquence centennale (Source : HYDRO).

Les crues de la Garonne toulousaine ont encore aujourd'hui un effet morphogène. La crue du 25-26 Janvier 2014, dont l'intensité se situe entre la décennale du 25 janvier 2004 et la trentennale du 11 juin 2000, a notamment eu différents effets sur les berges et la plaine (CATeZH Garonne), tels que d'importantes accumulations de sable et de limon (Fig. 2.11-a), la remobilisation d'atterrissements et d'îlots, des épisodes d'érosion de berge (Fig. 2.11-b), ou encore le déchaussement de routes (Fig. 2.11-c). Les interventions du génie civil ont toutefois rapidement permis la remise en état des structures affectées.



Figure 2.11 : Dégâts causés par la crue du 25-26 Janvier 2014 sur les berges et la plaine de la Garonne toulousaine (photographies diffusées en ligne par l'association Nature Midi-Pyrénées (CATeZH Garonne), auteur non spécifié). a) dépôts de sable sur un sentier de la commune de Verdun-sur-Garonne ; b) érosion de berge à Grenade ; c) déchaussement de route et inondation à Montech.

2.2.4. Changement fluvial identifié

A partir de la seconde moitié du XX^e siècle, plusieurs processus d'altération de la dynamique fluviale ont été observés sur la Garonne toulousaine, dont le mieux renseigné est le phénomène d'incision. Plusieurs auteurs ont quantifié ponctuellement ce phénomène en différents points du linéaire compris entre Toulouse et la confluence du Tarn (Table 2.3 - Beaudelin, 1989 ; SMEPAG, 1989 ; Steiger et Gazelle, 1994 ; DDE 82, 2006). L'essentiel des données a été synthétisé par Steiger et al. (2000), qui estiment l'enfoncement moyen du lit à 2,4 cm/an au cours de la période 1920-1986 (1,6 m en 66 ans) et identifient une accentuation du phénomène qui atteint 4,8 cm/an entre 1960 et 1980. Cette accélération de l'incision s'accompagne de différents événements, tels que la déconnexion de bras secondaires (DDE 82, 2006 ; Valette, 2002) ; le déchaussement de piles de pont (SMEPAG, 1989) ; la rupture d'une conduite de gaz au niveau de Beauzelle (en 1981 - Beaudelin, 1989) ; ou encore la formation d'une double berge (DDE 82, 2006). Cette incision a consisté dans un premier temps en l'évacuation du tapis alluvial, dont l'épaisseur était estimée entre 1,50 m et 3 m en moyenne au début des années 1960 (Beaudelin, 1989), puis au surcreusement dans le substratum molassique. L'importance des surfaces couvertes par les affleurements de molasse dans la portion amont de la Garonne toulousaine révèle l'ampleur particulière du phénomène dans ce secteur et atteste de son hétérogénéité le long du linéaire (Steiger et al., 2000). En même temps que ce phénomène d'incision, une réduction du régime d'étiage (Q30 : le 30^e débit le plus bas de l'année - Steiger et al., 1998) a été enregistrée à partir des années 1960. D'autres phénomènes accompagnant ce processus ont enfin été supposés, tels que l'abaissement de la nappe alluviale et la réduction des débordements sur la plaine, qui sans avoir été quantifiés, se sont traduits par différentes modifications sur la plaine, notamment le dépérissement de la forêt alluviale, observé depuis les années 1980 (Steiger et al., 1998 ; James, 1996).

| Publication | Secteur d'étude | Période d'étude | Dépérissement de la forêt alluviale (%) | Incision (cm/an) | Q30 (m ³ /s) |
|--|--|------------------------|---|------------------|-------------------------|
| PHENOMENE RECENT | | | | | |
| Steiger et al. (1998) | Garonne toulousaine | 1950-1980 1980-2000 | 0 70 | | |
| PHENOMENE APPARU DANS LES ANNEES 1960 | | | | | |
| DDE 82 (in Beaudelin, 1989) | Station de Très Cassés (82) | 1931-1960 1960-1987 | | 0,4 3,6 | |
| Steiger et al. (1998) | Garonne toulousaine | 1910-1960 1960-2000 | | | [37-95] [34-85] |
| Steiger et al. (2000) | Garonne toulousaine / Très Cassés (82) | 1920-1986 1960-1980 | | 2,4 4,8 | |

Table 2.3 : Synthèse des processus observés.

L'accentuation de l'incision du lit au cours du XX^e siècle, a principalement été mise en relation avec les extractions industrielles de granulat en lit mineur (Fig. 2.12), le phénomène s'étant développé par érosion progressive et régressive autour des fosses d'extraction (Beaudelin, 1989 - Fig. 2.12-A). Ces extractions ont essentiellement eu lieu entre les années 1960 et les années 1980, date à partir de laquelle elles ont été interdites en lit mineur par le ministère de l'Environnement (application en 1985 en Haute-Garonne et 1986 en Tarn-et-Garonne - Beaudelin, 1989 - Fig. 2.12-B).

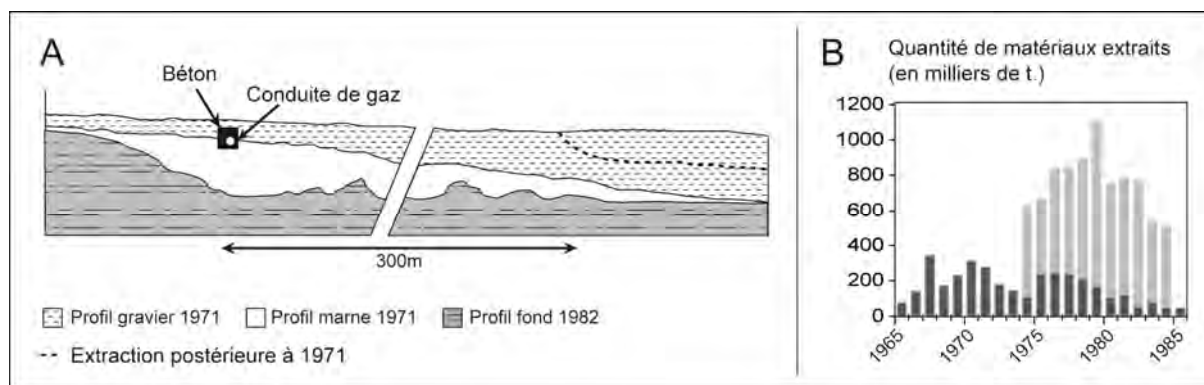


Figure 2.12 : Extractions de granulat dans le lit mineur de la Garonne (modifié d'après Beaudelin, 1989). A - Schéma d'évolution du profil en long de la Garonne au droit de Beauzelle. B - Quantité de matériaux extraits du lit de la Garonne entre 1965 et 1985 dans les départements de la Haute-Garonne (gris foncé) et du Tarn-et-Garonne (gris clair).

L'ensemble des phénomènes observés a également été mis en relation avec la campagne de travaux de fixation des berges réalisée entre 1960 et 1984 dans le département du Tarn-et-Garonne, suite à la crue de 1952 (temps de retour de 25 à 30 ans). Cette campagne de travaux s'est déroulée en 13 tranches (Fig. 2.13), qui ont principalement consisté à stabiliser les sinuosités du chenal par la mise en place d'enrochements dans les concavités de méandre et d'épis de protection sur certaines berges. Plusieurs boucles de méandres ont aussi été rescindées dans les secteurs particulièrement mobiles de Bourret et de Cordes-Tolosannes (SMEPAG, 1989a ; Steiger et al., 2000 ; Valette, 2002).

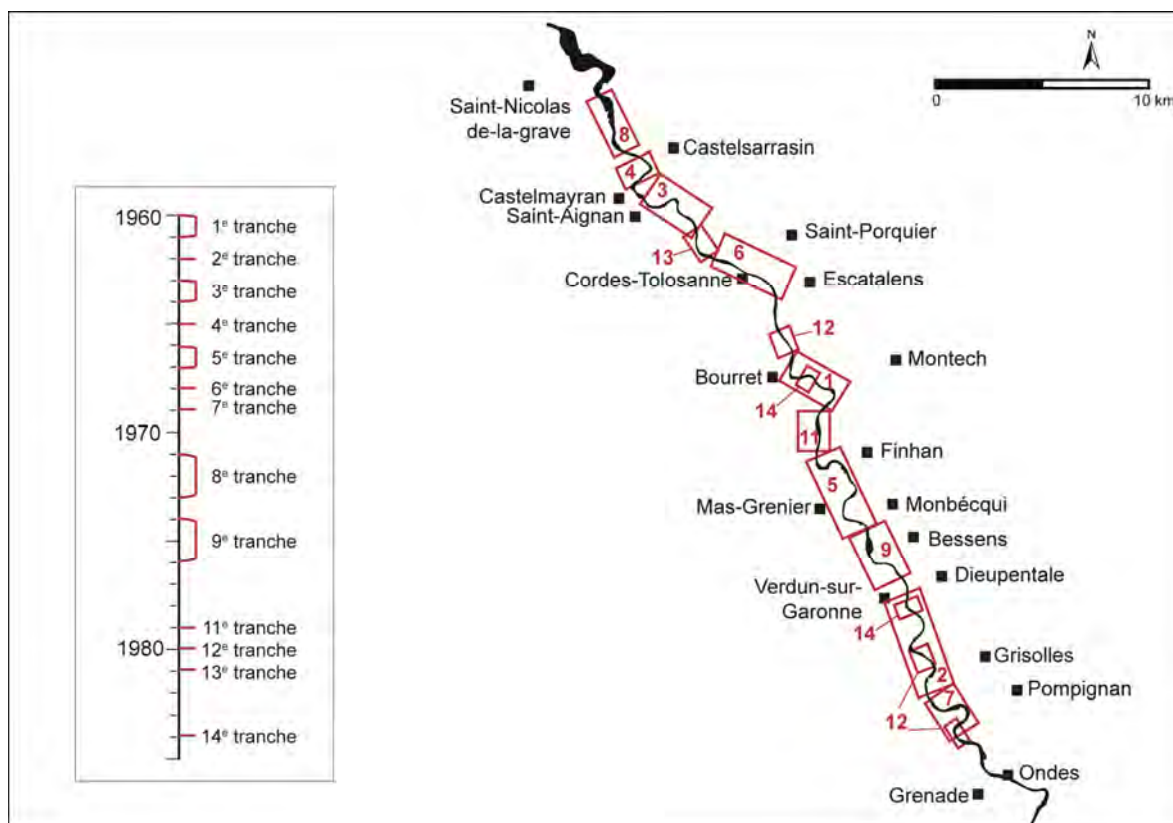
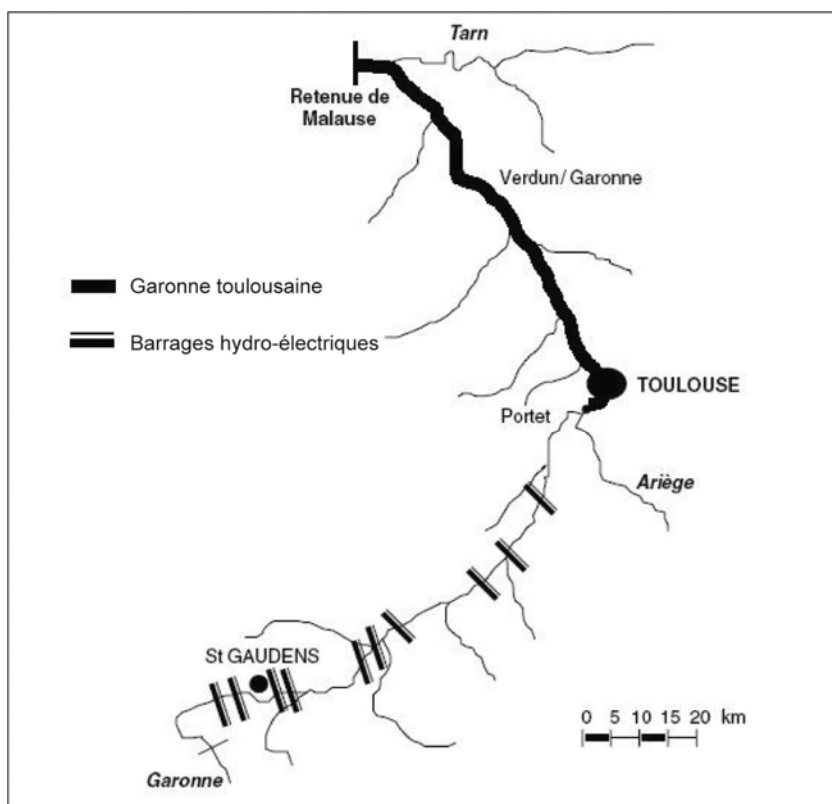


Figure 2.13 : Synthèse des travaux de stabilisation des berges réalisés dans le département du Tarn-et-Garonne entre 1960 et 1984 (modifié d'après Valette, 2002).

Un facteur additionnel global de déficit en charge solide a par ailleurs été envisagé, lié aux extractions de granulat en lit mineur mais aussi à la réduction de la recharge latérale dans le chenal, limitée par les enrochements de berge et à la mise en place de barrages dans les Pyrénées (Fig. 2.14 - Beaudelin, 1989 ; Steiger et al., 1998 ; Steiger et al., 2000).

La mise en place des barrages pyrénéens, associée à l'accentuation des prélèvements pour l'irrigation et à un phénomène de fonte des glaciers en amont du bassin, a aussi été invoquée pour expliquer la réduction des débits, notamment les débits d'étiage (Steiger et al., 1998).

Figure 2.14 : Barrages hydro-électriques sur le cours de la Garonne montagnarde (modifié d'après Sauvage et al., 2003)



2.2.5. Démarches et projets de restauration en cours

Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) Adour-Garonne 2010-2015, a identifié la Garonne toulousaine comme *zone verte*, terme qui désigne "les écosystèmes aquatiques et zones humides remarquables qui méritent une attention particulière et immédiate à l'échelle du bassin" - SIE Adour-Garonne). D'autres dispositifs de conservation ont par ailleurs été mis en place le long du linéaire (Natura 2000, ZNIEFF, ZICO, APPB - Valette et al., 2014).

Pour tenter de préserver et d'améliorer la qualité des zones humides de la Garonne toulousaine, diverses démarches d'entretien et de restauration ont donc été entreprises, qui impliquent des acteurs nombreux, diversifiés et souvent interconnectés par le biais de partenariats : Agence de l'eau, Conseil Régional, Conseils Départementaux, associations et syndicats (e.g., l'association *Nature Midi-Pyrénées* et le syndicat mixte d'étude et d'aménagement de la Garonne - SMEAG), communes, etc. Les actions entreprises au titre de la gestion et/ou la restauration des zones humides sont tout aussi diverses, avec des efforts fournis en terme de surveillance des espèces menacées (e.g., suivi des populations de héron), des démarches de gestion, voire de restauration des milieux originaux (entretien des prairies fluviales, restauration de la forêt alluviale, etc.), des actions pour la sensibilisation et le retour au fleuve des populations riveraines (aménagement de parcours de promenade, installation de panneaux d'information, etc.), etc. Parmi les démarches entreprises, seules quelques unes représentent une action directe sur la dynamique hydromorphologique de la Garonne (principalement des dégagements d'atterrissements ou des aménagements de berges).

A titre d'exemple, l'association régionale de protection de la nature *Nature Midi-Pyrénées*, créée en 1969, intervient dans la gestion et de la restauration (au sens large) des zones humides de la Garonne toulousaine depuis la fin des années 1980. Dans le cadre d'une autorisation d'occupation temporaire (AOT) du domaine public fluvial (DPF), elle est aujourd'hui le gestionnaire direct de quatre sites dans la partie haute-garonnaise du linéaire (85 ha : répartis sur les communes d'Ondes, Grenade, Saint-Caprais et Merville), sur lesquels elle applique en partie une politique de laisser aller susceptible d'avoir des effets localisés sur la dynamique fluviale. Cette association est par ailleurs à l'origine de la création en 2008 d'une cellule d'assistance technique à la gestion des zones humides (CATEZH) de la Garonne, chargée d'accompagner les maîtres d'ouvrages de projets de gestion pour notamment "l'amélioration de la qualité de l'eau, la régulation des flux hydrologiques (lutte contre les inondations et soutien d'étiage) et le maintien d'une biodiversité patrimoniale et ordinaire" (CATEZH Garonne). Depuis sa création en 2008, la CATEZH Garonne a pour l'instant participé au lancement et à la gestion de 14 sites de restauration en Haute-Garonne et Tarn-et-Garonne, dont neuf sont situés en Garonne toulousaine. Les interventions directes sur la dynamique hydromorphologique sont cependant secondaires (Table 2.4).

| Site | Surface (ha) | Commune | Plan de gestion | Actions |
|------------------------|--------------|-------------|-----------------|--|
| Méandre de Port Haut | 20 | Saint-Jory | 2006-2010 | Enlèvement de 350 m ³ de déchets |
| | | | | Suppression du passage busé en travers du bras mort et entretien de la connexion aval |
| | | | | Création d'un sentier hors zones sensibles pour la flore et la faune avec signalétique d'interprétation |
| | | | 2012-2016 | Suivis de l'érosion latérale |
| | | | | Surveillance de la connexion aval du bras |
| Mauvers les Bordes | 26 | Grisolles | 2007-2011 | Poursuite de la gestion des milieux ouverts avec gestion des espèces invasives |
| | | | | Restauration de la vanne amont du bras et suivis piscicoles |
| | | | | Mise en place d'un panneau à l'entrée du site, de tables de pique-nique et installation d'un sentier nature le long d'une boucle de promenade |
| | | | 2012-2016 | Gestion différenciée de la prairie centrale et des lisières |
| | | | | Mise en place d'un suivi des reptiles |
| | | | | Fauche annuelle de la prairie avec îlots non fauchés |
| | | | | Etablissement de lisières complexes en bordure du bras |
| Îlot de Saint-Cassian | 70 | Mas-Grenier | 2008-2010 | Réduction de la largeur de la boucle de promenade |
| | | | | Gestion courante hebdomadaire |
| | | | | Poursuite du protocole herpétologique |
| | | | 2012-2014 | Plantation de boisements patrimoniaux en lieu et place des peupliers, afin de créer une zone tampon avec les boisements naturels qui hébergent la colonie d'ardéidés |
| | | | | Maintien d'une zone ouverte par girobroyage pour reconstituer une prairie et conforter la mosaïque d'habitats |
| | | | | Suivi et protection de la colonie d'ardéidés |
| Roselière des Gourgues | 2 | Fenouillet | 2009-2011 | Installation d'un troupeau d'ovins sur la prairie afin de limiter les interventions mécaniques |
| | | | | Gestion des espèces exotiques invasives |
| | | | | Réalisation d'un sentier pédagogique accessible en dehors des périodes interdites pour la préservation de la colonie de hérons |
| | | | | Installation d'un batardeau sur le petit cours d'eau du Ricotier qui longe la roselière pour pérenniser son alimentation en eau |
| | | | | Plantation d'une haie champêtre afin de préserver la tranquillité du site par l'installation d'une barrière végétale |
| | | | | Création d'un sentier pédagogique. |

| | | | | |
|-------------------------|-----|--------------------|-----------|---|
| Ile de Martignac | 40 | Grenade | 2009-2011 | Nettoyage du site de ses déchets |
| | | | | Fermeture des accès par une barrière associée à l'affichage de la réglementation afin de mieux gérer les usages |
| | | | 2012-2014 | Dévégétalisation d'un atterrissement, en complément de l'utilisation d'un cheval pour le dessouchage |
| | | | | Gestion réalisée par les services de la Commune afin de maintenir la qualité du site par exemple par la gestion des espèces exotiques invasives comme l'ailante (<i>Ailantus altissima</i>) |
| | | | | Suivi de la population d'ormes lisses |
| La Nautique | 4,8 | Grenade | 2012-2014 | Suivi de la mobilité et de la dynamique d'un atterrissement par marquage à la peinture |
| | | | | Suivi du bras-mort et entretien de ses connexions suite aux crues |
| | | | | Mise en place d'inventaires et de compléments d'inventaire (insectes, reptiles, oiseaux) |
| Berges du pont d'Ondes | 16 | Ondes | 2013-2015 | Création d'un sentier pédagogique et de panneaux pédagogiques |
| | | | | Suivi de la zone d'érosion et sécurisation de ses abords par plantation d'une haie |
| | | | | Reconstitution de la ripisylve dégradée par plantation au niveau des secteurs de loisir de la Commune |
| Bras mort de Lespinassé | 87 | Bourret | 2013-2016 | Création d'un sentier pédagogique et mise en place d'une signalétique. |
| | | | | Projet de reconnexion du bras-mort par retrait de la buse et reprofilage de l'aval du bras |
| | | | | Plantation d'un boisement patrimonial en mosaïque sur un secteur ouvert dégradé |
| Île de Labreille | 32 | Verdun-sur-Garonne | 2014-2016 | Régulation de la circulation motorisée |
| | | | | Création d'un sentier pédagogique |
| | | | | Suivi écologique et fonctionnel du site sans intervention sur les milieux |
| | | | | Accueil maîtrisé du public (aménagement du parking, valorisation pédagogique de l'observatoire ornithologique) |
| | | | | Gestion des sentiers par fermeture des passages inutiles à la découverte du site |

Table 2.4 : Actions de gestion et restauration menées par la CATeZH Garonne et ses partenaires sur neuf sites le long de la Garonne toulousaine (CATeZH Garonne). Les lignes grisées sont celles qui concernent directement la dynamique hydromorphologique des sites.

Plusieurs exemples de démarches développant une approche intégrée et durable de la gestion des zones humides de la Garonne toulousaine, initiées par d'autres acteurs, peuvent par ailleurs être citées :

- le réseau de sites Espaces Naturels Sensibles, mis en place depuis 1988 par le Conseil Départemental du Tarn-et-Garonne, qui a permis de valoriser et préserver une vingtaine de sites présentant un intérêt écologique, patrimonial et/ou paysager ;
- le projet *Territoires Fluviaux Européens* (TFE, 2011-2015) réalisé par le SMEAG en partenariat avec la Communauté Forale de Navarre et cofinancé par le programme Interreg IVB Sud-ouest européen et l'Agence de l'eau Adour-Garonne, qui a notamment "permis d'élaborer un plan d'action visant à préserver les services rendus par la Garonne aux habitants de sa vallée" à partir d'une concertation entre gestionnaires, universitaires et riverains ;
- ou encore le projet *Grand Parc Garonne* (2015-2018) lancé par la Communauté Urbaine Toulouse Métropole (CUTM), visant à aménager les berges de la Garonne au sein de la CUTM (32 km), essentiellement dans une optique de retour au fleuve (promenades, sports, découverte culturelle, etc.).

2.3. Conclusion du chapitre 2

La *Garonne toulousaine*, entre la confluence de l'Ariège à Toulouse-Portet et la confluence du Tarn à Malause, correspond à un linéaire sinueux à méandrique de 90 km de longueur, qui s'écoule au sein d'une basse plaine encaissée dans un système de terrasses pléistocènes. Ce linéaire contraste avec un régime plus montagnard à l'amont (partie pyrénéenne du bassin versant) et un régime sous influence méditerranéenne à l'aval du Tarn (réception des apports du Massif Central). Au sein de la Garonne toulousaine, les affleurements de molasse et la charge grossière résiduelle révèlent une charge solide réduite, essentiellement composée de sables et de limons, qui représente le premier indice d'un phénomène généralisé d'incision, observé depuis les années 1960. A l'image de l'évolution observée à l'échelle planétaire, ce phénomène, ainsi que d'autres changements dans le régime hydro-sédimentaire de la Garonne toulousaine, ont été attribués à une série de facteurs anthropiques du XX^e siècle (extractions de granulats en lit mineur, chenalisation de la portion tarn-et-garonnaise, mise en place de barrages sur le cours de la Garonne et dans son bassin versant et prélèvements d'eau pour l'irrigation). De ce fait, des interventions mineures du génie civil suffisent la plupart du temps à contrer l'effet morphogène des crues de la Garonne toulousaine. Devant le constat d'une dégradation des milieux aquatiques et humides, diverses démarches de restauration au sens large ont été entreprises depuis les années 1980. Toutefois, à ce jour, les démarches visant réellement à intervenir sur la dynamique hydromorphologique de la Garonne restent anecdotiques.

Chapitre 3. - Projet de thèse : enjeux de recherche, objectif ciblé et démarche méthodologique mise en œuvre

Ce troisième chapitre vise à définir et expliciter le projet de thèse à l'origine de cette étude. Une brève revue des publications scientifiques portant sur la dynamique fluviale de la Garonne est d'abord proposée (1). Sur cette base, les enjeux de recherche actuels sur la trajectoire historique de la Garonne toulousaine sont ensuite présentés (2). L'objectif de cette étude (3) et la démarche méthodologique globale mise en œuvre (4) sont enfin annoncés.

3.1. Synthèse des travaux antérieurs

Les premiers éléments de connaissance apportés sur la dynamique fluviale de la Garonne, reposaient principalement sur des approches typologiques et/ou monographiques, à des échelles allant du tronçon au continuum fluvial (Table 3.1 - en blanc). Ces travaux ont permis de mieux comprendre la dynamique des crues (Serret, 1874 ; Pardé, 1928 ; Fischer, 1932 ; Pardé, 1935), l'organisation transversale de la basse plaine (Cavaillé, 1965 ; SMEPAG, 1989) et les variations de la dynamique hydromorphologique le long du gradient amont/aval (Lambert, 1988).

De la fin des années 1980 aux années 2000, une série de travaux plus problématisés et centrés sur la Garonne toulousaine a vu le jour (Table 3.1 - en gris clair) et a permis de mettre en évidence les phénomènes d'incision et de chenalisation que l'on connaît aujourd'hui (cf. 2.2.4 - Beaudelin, 1989 ; Steiger et al., 1998 ; Steiger et Corenblit, 2000 ; Steiger et al., 2000). Ces travaux ont cherché à évaluer l'impact des aménagements et pratiques intensives de la seconde moitié du XX^e siècle par le biais d'une approche quantitative. Les données utilisées sont issues de mesures de terrain (débits, niveaux de la lame d'eau, profils longitudinaux, profils transversaux, etc.) et de l'analyse des photographies aériennes. Certains indices hydro-géomorphologiques proposés résultent d'observations sur le lit actuel (indice de débordement, forme du profil en long, surfaces des plages de galet, surface des affleurements de molasse) ; d'autres amorcent une approche diachronique, tout en gardant le focus sur la seconde moitié du XX^e siècle (taux d'incision du lit, évolution des débits de plein bord, dépérissement de la forêt alluviale, évolution de l'indice de sinuosité).

Depuis le début des années 2000, la question du temps long est devenue plus pressante (Table 3.1 - en gris foncé), avec des travaux à dimension paléoenvironnementale d'une part, inscrits dans la lignée des travaux de Hubschmann (1975), et des travaux à dimension géohistorique d'autre part, plus proches de ceux de Decamps et al. (1989). Les premiers ont cherché à comprendre le mode de construction des terrasses et de la basse plaine de la Garonne toulousaine au cours du Pléistocène moyen à supérieur et ont ainsi contribué à améliorer notre connaissance du milieu d'écoulement (Bruxelles et al., 2010 ; Bruxelles et Jarry, 2011 ; Carozza et al., 2013 ; Carozza et al., 2014 ; Ferdinand, 2014 ; Stange et al., 2014). Les seconds ont abordé l'évolution des paysages fluviaux et des usages du fleuve à l'échelle du linéaire fluvial ou de sites localisés au sein de la Garonne toulousaine, sur des périodes séculaires à pluriséculaires et reposent sur l'analyse qualitative à semi-quantitative d'archives textuelles, photographiques et cartographiques (Valette et Gazelle, 2000 ; Valette, 2002 ; Valette et Carozza, 2010 ; Valette et Carozza, 2013 ; Valette et al., 2014). Bien qu'ils ne proposent que quelques éléments de quantification de l'évolution de la dynamique fluviale (indice de sinuosité, largeur de la bande active et nombre d'îles), ces derniers travaux présentent l'avantage de montrer une "image" du fleuve sur la période antérieure au XX^e siècle.

| AUTEUR | TITRE | ANNEE |
|----------------------|---|-------|
| Serret | <i>Les débordements de la Garonne dans l'Agenais depuis les temps anciens jusqu'à nos jours</i> | 1874 |
| Pardé | <i>Périodicité des grandes inondations et crues exceptionnelles</i> | 1928 |
| Fischer | <i>Le régime de la Garonne pyrénéenne</i> | 1932 |
| Pardé | <i>Le régime de la Garonne</i> | 1935 |
| Cavaillé | <i>Les unités morphologiques des basses plaines de la Garonne</i> | 1965 |
| Hubschmann | <i>Les terrasses récentes de la Garonne et leur évolution</i> | 1975 |
| Beaudellin | <i>Conséquences de l'exploitation des granulats dans la Garonne</i> | 1989 |
| Decamps et al. | <i>Historical changes of the Garonne River, Southern France</i> | 1989 |
| Lambert | <i>Atlas géomorphologique du lit de la Garonne</i> | 1988 |
| SMEPAG | <i>Monographie des crues de la Garonne</i> | 1989 |
| Steiger et al. | <i>Channelization and consequences on floodplain system functioning on the Garonne River, SW France</i> | 1998 |
| Steiger et Corenblit | <i>Dynamique fluviale de la Garonne toulousaine.</i> | 2000 |
| Steiger et al. | <i>Les ajustements morphologiques contemporains du lit mineur de la Garonne, France, et leurs effets sur l'hydrosystème fluvial</i> | 2000 |
| Valette et Gazelle | <i>L'impact des sociétés du XVIII^e et du XIX^e siècles sur les paysages garonnais</i> | 2000 |
| Valette | <i>Les paysages de la Garonne : les métamorphoses d'un fleuve</i> | 2002 |
| Bruxelles et al. | <i>Ages et modalité de la mise en place de la couverture limoneuse de la basse plaine de la Garonne d'après l'exemple du site de Fontréal (Castelnau-d'Estrétefonds, Haute Garonne)</i> | 2010 |
| Valette et Carozza | <i>Mise en œuvre d'une démarche géohistorique pour la connaissance de l'évolution des paysages fluviaux : l'exemple de la moyenne vallée de la Garonne</i> | 2010 |
| Bruxelles et Jarry | <i>Climatic conditions, settlement patterns and cultures in the Paleolithic :The example of the Garonne Valley (southwest France)</i> | 2011 |
| Carozza et al. | <i>L'architecture sédimentaire de la basse plaine de la Garonne moyenne en aval de Toulouse : premiers résultats</i> | 2013 |
| Valette et Carozza | <i>Toulouse face à la Garonne : emprise de l'urbanisation dans la plaine inondable et géohistoire des aménagements fluviaux</i> | 2013 |
| Carozza et al. | <i>The subfossil tree deposits from the Garonne Valley and their implications on Holocene alluvial plain dynamics</i> | 2014 |
| Ferdinand | <i>La Garonne en aval de Toulouse : dynamique d'un fleuve et de sa plaine inondable sur la longue durée</i> | 2014 |
| Stange et al. | <i>Linking morphology across the glaciofluvial interface : A 10Be supported chronology of glacier advances and terrace formation in the Garonne River, northern Pyrenees, France</i> | 2014 |
| Valette et al. | <i>Construction géohistorique du "sauvage" de la Garonne toulousaine : quelle part de naturalité dans les paysages fluviaux ?</i> | 2014 |

Table 3.1 : Synthèse des principaux travaux antérieurs sur la dynamique fluviale de la Garonne, reprenant la classification présentée dans le texte.

De nombreux travaux qui n'entrent pas dans les grandes catégories établies précédemment, viennent compléter cette synthèse en abordant des phénomènes associés à la dynamique fluviale de la Garonne, avec par exemple :

- en géomorphologie, les travaux de Steiger et Gurnell (2002) sur les modes de dépôt en zone riveraine le long de la Garonne toulousaine ou plus récemment, ceux de Lescure (2015) sur la Garonne maritime à l'Holocène ;
- en géohistoire, les travaux de Deffontaine (1932) sur les usages du fleuve à l'aval du Tarn ;
- en géographie des risques, les travaux d'Antoine (2009 et 2011) et de Métailié (2006) sur les risques naturels dans les Pyrénées au cours des derniers siècles ;
- en histoire, les travaux de Laffont (1997), qui abordent la question des inondations historiques de la Garonne à Toulouse ;
- en écologie, les travaux de Fortuné (1988) sur les usages passés et l'écologie de la Garonne, ceux de James (1996) sur le dépérissement des boisements riverains ou encore ceux de Muller et al. (2002) sur l'évolution des populations de peupliers en Garonne moyenne ;
- en géoscience, de nombreux travaux sur le transport solide de la Garonne tels que les travaux de Maneux (2001) sur l'effet piège des barrages, ceux de Mamoudou (2008) sur les éléments organiques et inorganiques transportés par la Garonne toulousaine ou encore les travaux de Garneau (2014) sur le transfert des éléments traces métalliques.

3.2. Enjeux de recherche sur la trajectoire historique de la dynamique fluviale de la Garonne toulousaine

Les travaux antérieurs sur la dynamique fluviale de la Garonne toulousaine forment un corpus dense et diversifié. Toutefois, plusieurs questions concernant l'évolution historique de ce linéaire fluvial n'ont pas encore été traitées. Ces zones d'ombre peuvent représenter une limite en termes de gestion du linéaire, notamment dans l'optique de la restauration hydromorphologique.

3.2.1. La question de la tendance évolutive du linéaire

Les travaux problématisés, centrés sur la seconde moitié du XX^e siècle (Table 3.1 - en gris clair), ont clairement identifié une rupture dans les années 1960, marquée par l'accentuation du phénomène d'incision et le lancement de la campagne de travaux de stabilisation des berges dans le département du Tarn-et-Garonne (cf. 2.2.4 - Beaudelin, 1989 ; Steiger et al., 1998 ; Steiger et Corenblit, 2000 ; Steiger et al., 2000). Toutefois plusieurs indices, qui n'ont pas retenu l'attention, suggèrent une réduction de la dynamique fluviale antérieure à cette rupture (Table 3.2) : initiation d'une phase légère d'incision dès le début du XX^e siècle (Beaudelin, 1989 ; Steiger et al., 2000), accompagnée d'une réduction des débits de plein bord (Steiger et al., 1998), d'une réduction de la longueur du linéaire (Valette, 2002)¹ et d'une contraction de la largeur moyenne de la bande active (Valette, 2002). Il est donc envisageable que les processus géomorphologiques observés à l'heure

¹ Concernant la longueur du chenal et l'indice de sinuosité, il faut toutefois noter que les travaux de Muller et al. (2002), menés sur un linéaire plus court mais sur un plus grand nombre de dates, ne révèlent qu'une oscillation entre 1,30 et 1,38 au cours de la période 1810-1980, sans réelle tendance à la réduction.

actuelle s'inscrivent dans une tendance évolutive à plus long terme que celle initialement retenue.

| Publication | Secteur d'étude | Période d'étude | Débit de plein bord (m ³ /s) | Longueur du chenal (km) | Largeur de la bande active (m) |
|--|-------------------------------------|-----------------|---|-------------------------|--------------------------------|
| PHENOMENES INSCRITS SUR LE TEMPS LONG | | | | | |
| Steiger et al. (1998) | Station de Toulouse-Portet | 1904-1933 | 1500 | | |
| | | 1934-1963 | 1250 | | |
| | | 1964-1993 | 1200 | | |
| Valette (2002) | Tronçon Saint-Aignan/Bourret | 1810 | | 11,8 | |
| | | 1860 | | 9,7 | |
| Valette (2002) | Tronçon Toulouse/Fenouillet | 1810 1988 | | | 211 159 |
| Valette (2002) | Tronçon Merville/Grenade | 1770 1988 | | | 207 168 |
| Valette (2002) | Tronçon Mas-Grenier/Bourret | 1810 1988 | | | 245 192 |
| Valette (2002) | Tronçon Saint-Aignan/Castelsarrasin | 1810 1988 | | | 370 163 |

Table 3.2 : Synthèse des processus géomorphologiques observés avant la seconde moitié du XX^e siècle.

3.2.2. La question des facteurs de contrôle du changement

Les facteurs de contrôle de l'évolution de la Garonne toulousaine ont pour l'instant été appréhendés sous l'angle de la grande accélération (Steffen et al., 2015 - cf. 1.3.3.). Le focus a ainsi été porté sur l'intensification des activités anthropiques au cours du XX^e siècle (extractions de granulat en lit mineur, protections de berge, barrages). Toutefois, à l'image des tendances observées sur plusieurs cours d'eau européens, deux types de facteurs antérieurs sont susceptibles d'être impliqués dans les processus géomorphologiques observés actuellement : les aménagements et usages historiques du lit de la Garonne et la transition climatique entre le Petit Âge Glaciaire (PAG) et le Réchauffement Global actuel (RG).

3.2.2.1. Les aménagements et usages anciens

Les travaux basés sur l'analyse des archives historiques cartographiques et textuelles (Valette, 2002 ; Valette et al., 2014) ont identifié une période au cours de laquelle la Garonne a été au centre de l'économie de la vallée, entre le XVII^e siècle et la moitié du XIX^e siècle (Fig. 3.1-A). Les documents relatifs à cette période, ont révélé la présence de constructions offensives (épis) jusqu'au début du XIX^e siècle, visant à concentrer l'écoulement pour gagner du terrain sur le fleuve et/ou favoriser la navigation (Fig. 3.1-A). Des interventions plus tardives, réalisées dans la même optique, ont par ailleurs été identifiées à partir du XVIII^e siècle (Fig. 3.1-A) :

- des plantations de jettins (petits arbustes) visant à stabiliser les berges (Fig. 3.1-B) ;

- des constructions défensives, telles que des traînées / gardes terrain mis en place pour protéger les berges contre l'érosion ou forcer le comblement de chenaux secondaires (Fig. 3.1-B) ;
- ou encore des extractions / dragages ponctuels en lit mineur pour faciliter l'écoulement.

Cette période, caractérisée par une forte activité liée à la navigation, a pris fin sous l'effet d'un déplacement du centre d'activité vers la plaine, lié à l'ouverture simultanée du canal latéral à la Garonne et du chemin de fer (1856 - Fig. 3.1-A). L'activité en lit mineur a alors progressivement muté vers une exploitation plus intensive des ressources, avec les extractions industrielles en lit mineur pour le développement des activités sur la plaine et plus en amont, la mise en place de barrages et de canaux d'irrigations.

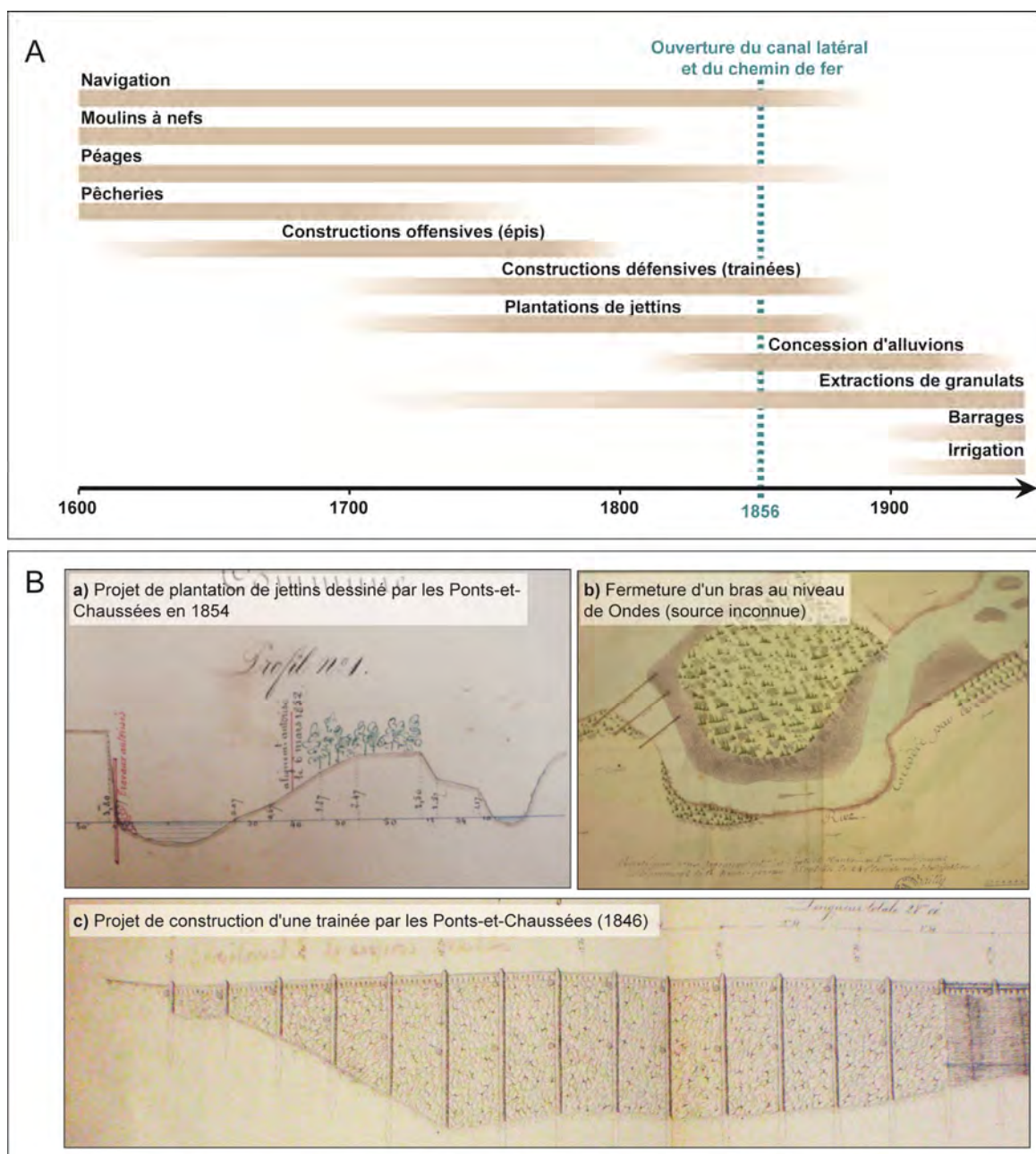


Figure 3.1 : Aménagements et usages historiques du lit de la Garonne toulousaine. A - Evolution des usages du fleuve entre les XVII^e et XX^e siècles (modifié d'après Valette, 2013). B - Documents historiques montrant les différents types d'aménagements fluviaux mis en place pour stabiliser le chenal.

3.2.2.2. La transition climatique entre Petit Âge Glaciaire (PAG) et Réchauffement Global (RG)

Les travaux menés sur le risque torrentiel dans Pyrénées (Antoine, 2009 et 2011) ont révélé une augmentation des inondations au cours des périodes 1750-1800 et 1850-1950, qui ont été reconnues comme des phases d'hydrodynamisme fort internes au PAG (Fig. 3.2-A). Cette chronique révèle une amorce de la transition PAG/RG au début du XX^e siècle dans les Pyrénées.

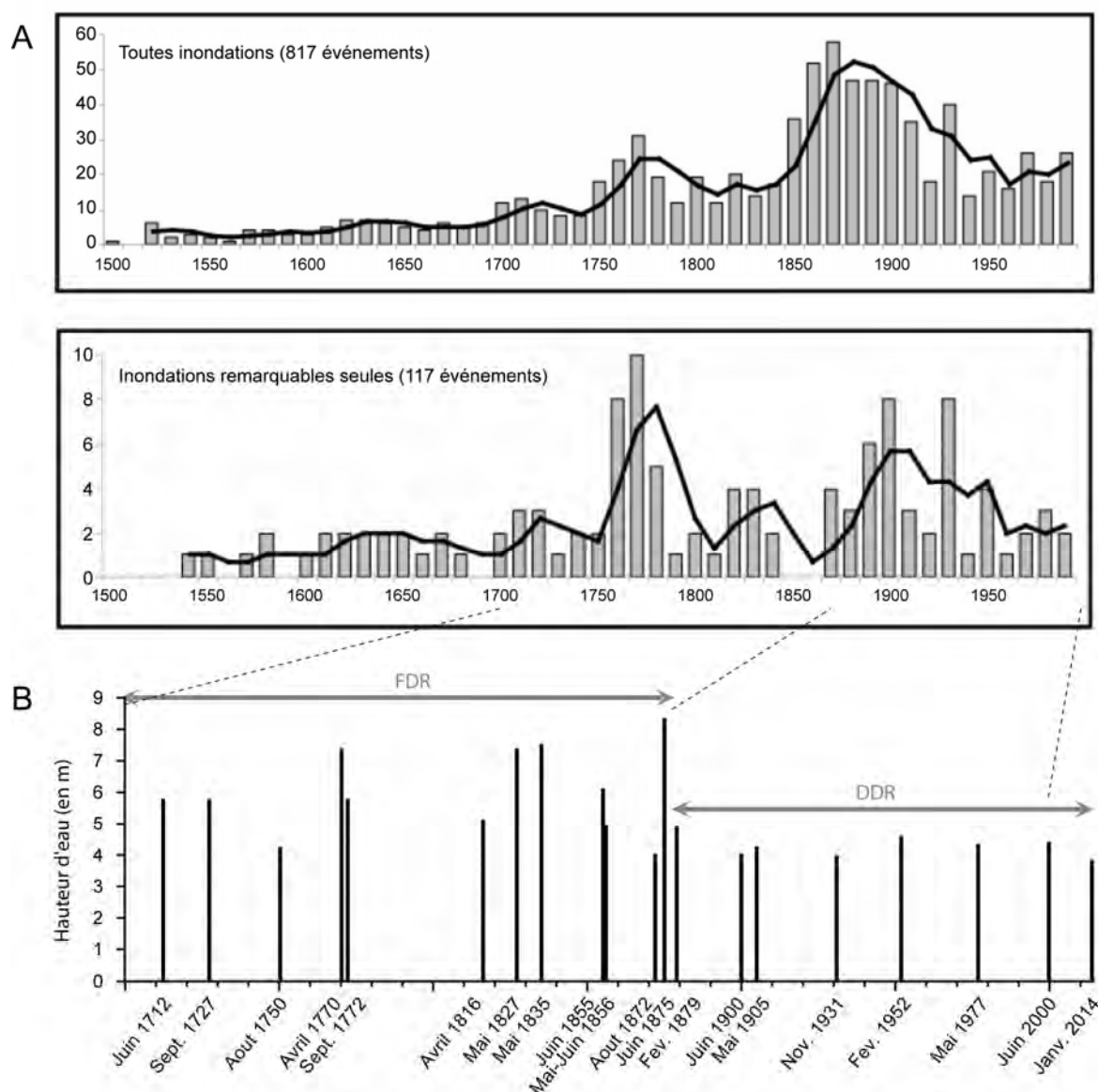


Figure 3.2 : Chroniques climatiques. A - Chronique des inondations dans les Pyrénées (Antoine, 2009). B - Chronique des hauteurs d'eau enregistrées à la station de Toulouse-Pont-neuf (Sources : HYDRO ; Serret, 1874 ; Pardé, 1928 ; Laffont, 1997). FDR : flood dominated regime (régime dominé par les crues) ; DDR : drought dominated regime (régime dominé par les étiages - Erskine et Warner, 1998).

La transition PAG/RG semble aussi transparaître sur la chronique des hauteurs d'eau enregistrée depuis 1855 à la station de Toulouse Pont-neuf (HYDRO) et complétée par des données issues de travaux d'historiens et de géographes (Fig. 3.2-B - Laffont, 1997 pour le XVIII^e siècle ; Serret, 1874, et Pardé, 1928, pour la première moitié du XIX^e siècle). Cette

chronique montre en effet une opposition entre un régime dominé par les crues (FDR) avant la fin du XIX^e siècle, marqué par des événements parfois dévastateurs comme la crue du 23 Juin 1875 (PHEC), et un régime atténué au cours du XX^e siècle (DDR), avec des hauteurs d'eau qui ne dépassent plus 4 m à Toulouse après 1880.

3.2.3. La question du style fluvial avant le XX^e siècle

Les travaux menés sur la trajectoire historique des paysages de la Garonne ont révélé un cours d'eau qualifié de "dynamique", "instable", ou encore "sauvage" avant le XX^e siècle. Plusieurs éléments soutiennent cette idée :

- la volonté de stabiliser le lit, révélée par les aménagements anciens abordés précédemment ;
- l'efficacité réduite de ces interventions sur le lit, révélée par de nombreuses plaintes de riverains liées à la destruction des ouvrages par les crues et/ou au déplacement de la tendance érosive sur une zone proximale après intervention ;
- les formes fluviales révélées par les documents cartographiques historiques, avec des atterrissements régulièrement remobilisés par les crues, des loupes d'érosion et des chenaux multiples séparés par de nombreuses îles (Fig. 3.3 - Valette, 2002 ; Valette et al., 2014).

Toutefois, aucun élément diachronique quantitatif ou suffisamment descriptif ne permet d'appréhender la morphologie et le comportement du chenal au plus fort du PAG.



Figure 3.3 : Représentation du chenal de la Garonne dans le secteur de Grenade/Ondes, datée de 1812 (Source : AD31).

3.2.4. La question de l'organisation spatiale des phénomènes

La plupart des travaux sur la Garonne toulousaine abordent le linéaire en tant qu'unité spatiale homogène. Toutefois, un gradient de pente amont/aval (cf. 2.2.2 - Steiger et al., 2000), ainsi qu'un gradient paysager (urbain/périurbain - Valette, 2002), ont clairement été identifiés le long du linéaire. Par ailleurs, des travaux menés à l'échelle du site ont montré des évolutions différentes d'un point à l'autre du linéaire. *E.g.*, à Toulouse, une modification très précoce du lit (dès 1680) a été identifiée et reliée à des interventions anthropiques sur le lit (Decamps et al., 1988) ; à Grenade, une simplification/stabilisation du tracé a été observée au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle (Fig. 3.4-A - Valette et Gazelle, 2000) ; à Cordes-Tolosannes une forte instabilité du fleuve a été constatée, jusqu'à son endiguement en 1968 (Fig. 3.4-B Valette et Carozza, 2010). Des nuances sont donc susceptibles d'exister au sein du linéaire, tant en terme de tendance évolutive, que de facteur de contrôle ou de fonctionnement hydro-sédimentaire.

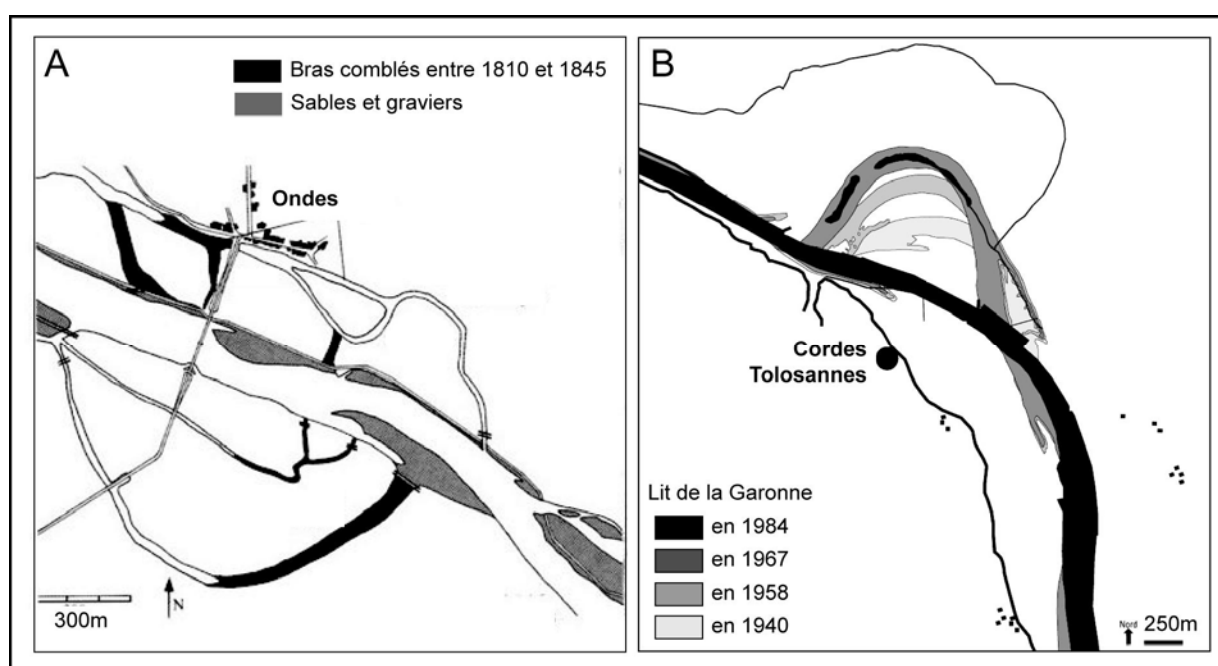


Figure 3.4 : Evolution des sites de Grenade (A - Valette et Gazelle, 2000) et Cordes-Tolosannes (B - Valette et Carozza, 2010)

3.2.5. Implication pour la restauration hydromorphologique

A l'heure actuelle, aucun plan de restauration hydromorphologique n'a été mis en oeuvre à l'échelle de la Garonne toulousaine. Si un tel projet était envisagé, les points de questionnement concernant la trajectoire historique du linéaire soulevés précédemment limiteraient la réflexion pour plusieurs raisons :

- L'ampleur du phénomène géomorphologique à contrer est encore difficile à évaluer. Il est possible que les changements observés s'inscrivent sur la durée, impliquant des processus lents, la notion d'*héritage* (effet cumulé des actions successives menées sur le cours d'eau au cours de l'histoire - Burnouf et Carcaud, 2000) et/ou un forçage climatique. Autant d'éléments qui remettraient en question la réversibilité du phénomène.

- Le fonctionnement hydro-sédimentaire de la Garonne avant le XX^e siècle est méconnu, ce qui pose la question de sa sensibilité à l'ajustement et donc de sa capacité à répondre à une opération de restauration.
- Il est possible que des disparités spatiales existent au sein de la Garonne toulousaine, en termes de style fluvial, de trajectoire d'évolution et/ou de facteur de contrôle de la dynamique fluviale, ce qui suggérerait la mise en place de démarches de gestion différenciées au sein de ce linéaire souvent considéré comme homogène.

3.3. Objectif de recherche

L'objectif de ce travail de thèse est de **reconstituer la trajectoire d'évolution de la Garonne toulousaine** afin d'apporter de nouvelles données en réponse aux questions de recherche abordées précédemment.

Ce terme de *trajectoire d'évolution* est issu du domaine de l'écologie, où il désigne le chemin évolutif d'un écosystème dans le temps (Chocat, 2013). Il désigne ici le chemin évolutif de la dynamique fluviale (Dufour, 2005 ; Piégay et al., 2006 ; Arnaud, 2012 ; Fryirs et al., 2012 ; Gregory, 2012 ; Ziliani et Surian, 2012 ; Brierley et al., 2013 ; etc.), à plusieurs niveaux d'analyse : formes fluviales (îles, bancs, chenaux), style(s) fluvial(aux) (méandrage, tressage, anastomose), processus hydromorphologiques (incision, aggradation, contraction, dilatation) et variables hydro-sédimentaires (débit liquide, transport solide, etc.).

Afin d'appréhender la complexité à la fois spatiale et temporelle sous-tendue dans la notion de trajectoire d'évolution, une double ambition de périodisation et de spatialisation des phénomènes est ciblée. Cette étude s'inscrit donc sur une période séculaire à pluriséculaire, afin de couvrir : 1) la période correspondant au Petit Âge Glaciaire (PAG) et à l'emprise de la navigation sur le fleuve ; 2) la transition entre le PAG et le Réchauffement Global (RG) actuel et 3) la rupture des années 1960, associée à l'intensification des pratiques anthropiques. L'échelle spatiale ciblée est celle du linéaire fluvial, afin d'évaluer la tendance évolutive globale, tout en saisissant des nuances au sein du linéaire, susceptibles de dépendre de facteurs de contrôle distincts.

3.4. Démarche méthodologique

Pour reconstituer la trajectoire d'évolution de la Garonne toulousaine, la démarche méthodologique mise en oeuvre dans cette thèse repose sur la complémentarité chronologique et spatiale des sources mobilisées : les ajustements planimétriques du lit sont appréhendés par le biais d'une approche géohistorique ; la géométrie 3D et le remplissage sédimentaire des anciens chenaux sont abordés par le biais d'une approche stratigraphique, empruntée à la géologie de surface.

3.4.1. La démarche géohistorique

La Garonne toulousaine est bien renseignée depuis le XVIII^e siècle par plusieurs types de documents historiques, permettant une approche géohistorique (cartes, photographies et textes - Jacob-Rousseau, 2009). Cette thèse se concentre sur les documents cartographiques couvrant l'ensemble du linéaire (Valette, 2004) et les aborde à deux niveaux d'analyse (Fig. 3.5) : 1) l'ensemble des documents est analysé de manière qualitative et 2)

les documents les plus précis et de meilleure qualité font en plus l'objet d'une analyse géomorphométrique des formes fluviales (analyse quantitative).

La première démarche permet une approche descriptive des styles fluviaux ainsi que des formes d'ajustement latéral du chenal d'une année sur l'autre (Fryirs et al., 2009), à l'échelle de la section/du sous-tronçon et sur une période de temps maximale (Fig. 3.5).

La seconde approche, consistant à calculer une série d'indices morphométriques le long du linéaire fluvial sur les cartes les plus précises et de meilleure qualité (*i.e.*, généralement les cartes les plus récentes - Fig. 3.5), permet d'une part la quantification de l'évolution des formes fluviales et d'autre part la discrimination de portions homogènes, lorsque les mesures sont répétées le long du linéaire (Alber et Piégay, 2011 ; Comiti et al., 2011 ; Ziliani et Surian, 2012 ; Bollati et al., 2014).

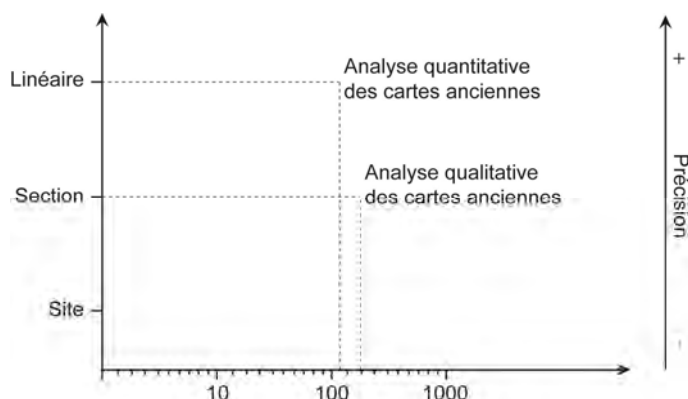


Figure 3.5 : Echelles d'analyse de l'approche géohistorique

Le recours aux archives cartographiques pour reconstituer la trajectoire d'évolution de la dynamique fluviale d'un cours d'eau présente toutefois plusieurs limites. Premièrement, la période de disponibilité des documents, ainsi que la dégradation de leur précision avec l'ancienneté, contraint la période d'étude aux quatre derniers siècles maximum, les objectifs des cartographes et leurs moyens techniques ne s'étant rapprochés de la réalité du terrain qu'à partir du XVI^e siècle. Deuxièmement, la dimension dynamique de l'évolution du cours d'eau est limitée par le fait que les périodes comprises entre les dates de levée des documents sont extrapolées. Enfin, les éléments représentés restent des formes en plan et ne permettent aucunement d'appréhender l'hydrosystème fluvial dans sa dimension verticale et en 3D.

3.4.2. La démarche stratigraphique empruntée à la géologie de surface

Cette thèse propose de pallier les différents verrous de l'approche géohistorique développée précédemment en couplant les travaux effectués sur les archives cartographiques à l'analyse de données issues de travaux de terrain menés sur plusieurs paléochenaux de la Garonne (Fig. 3.6).

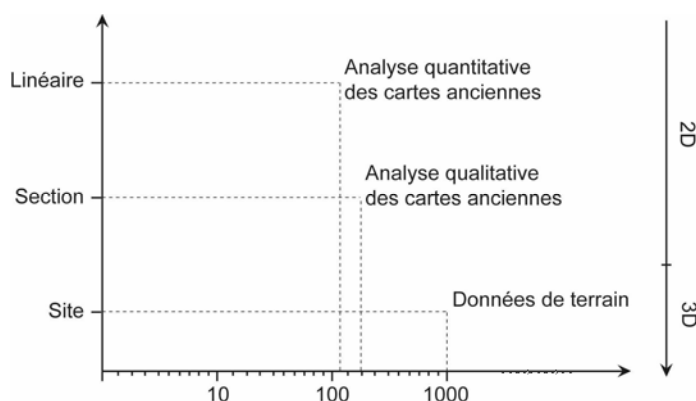


Figure 3.6 : Echelles d'analyse du couplage sources cartographiques / données de terrain

Les paléochenaux correspondent à d'anciens chenaux actifs, qui ont été recoupés (*i.e.*, déconnectés du chenal principal - Fig. 3.7) et progressivement comblés. Le comblement d'un paléochenal dépend de deux types d'apports (Rostan et al., 1997) : les *apports autogènes* correspondent à des apports principalement organiques, qui se décomposent progressivement ; les *apports allogènes* correspondent plutôt à une charge sédimentaire (pouvant contenir des fragments organiques), déposée à l'occasion de reconnections temporaires du bras et/ou de débordements de l'écoulement de crue dans la plaine. Une fois comblées, ces formes peuvent être identifiées sur vue aérienne par un gradient topographique et/ou végétal, ou encore par la morphologie du réseau routier. Certains paléochenaux aujourd'hui invisibles dans le paysage, peuvent aussi être identifiés grâce aux toponymes indicateurs de bras morts (gaule, gaure, etc.), ou encore à partir d'archives cartographiques.

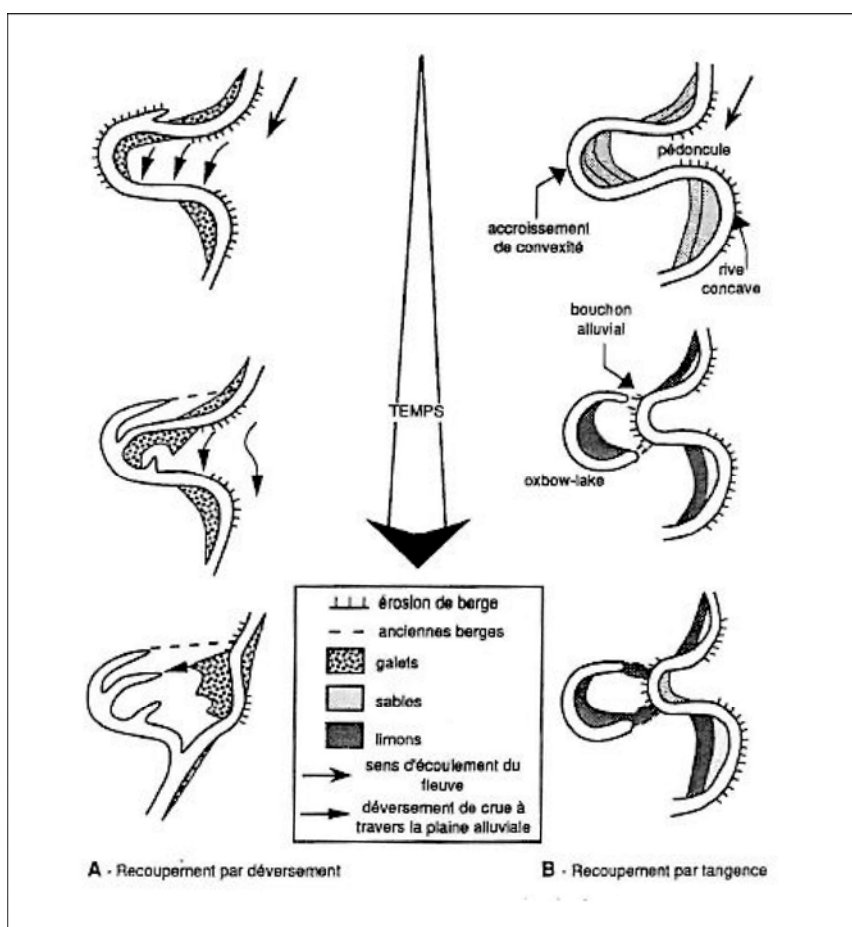


Figure 3.7 : Représentation schématique de deux types de recoupement de méandre (Amoros et Petts, 1993). A - Recoupement par déversement. B - Recoupement par tangence.

Appréhender la géométrie 3D des paléochenaux (largeur, profondeur et forme des berges et du fond) peut permettre d'identifier le style fluvial au moment de l'activité du chenal. L'application de certains principes de géométrie hydraulique peut en plus permettre le calcul d'indicateurs paléohydrauliques, tel que le paléodébit à plein bord (Leopold et Maddock, 1953 ; Hey et Thorne, 1986).

Par ailleurs, le remplissage des paléochenaux enregistre l'historique des événements de crue au cours de la période comprise entre la phase de déconnexion du bras et la disparition de la forme dans la topographie locale (Salvador et Berger, 2014). L'étude de ce remplissage peut donc apporter des éléments de compréhension sur la dynamique fluviale lors du fonctionnement du chenal (charge de fond), ainsi que sur son mode de comblement. La

découverte d'éléments organiques susceptibles d'être datés (^{14}C), peut en plus permettre d'étendre la période couverte par les cartes et d'affiner la compréhension du fonctionnement hydro-sédimentaire du chenal au cours de cette période. Dans cette dernière optique, le recours à d'autres méthodes de datation (OSL, isotopes stables ^{137}Cs ou ^{210}Pb) pour les périodes récentes est également envisageable.

3.5. Conclusion du chapitre 3

Une brève revue de la littérature scientifique sur la dynamique fluviale de la Garonne toulousaine permet de souligner plusieurs points de questionnement concernant la trajectoire historique du linéaire :

- les processus géomorphologiques observés depuis les années 1960 (principalement incision et chenalisation) sont susceptibles de s'inscrire dans une tendance évolutive à plus long terme ;
- les aménagements et usages anciens sur le fleuve, ainsi que la transition climatique entre le Petit Âge Glaciaire (PAG) et le Réchauffement Global (RG) actuel pourraient être impliqués dans le contrôle de la dynamique fluviale actuelle ;
- le style fluvial qui caractérisait la Garonne toulousaine avant le XX^e siècle, n'est pour l'instant renseigné par aucun élément diachronique quantitatif ou suffisamment descriptif ;
- des disparités spatiales sont susceptibles d'exister au sein du linéaire, tant en termes de tendance évolutive, que de facteur de contrôle ou de fonctionnement hydro-sédimentaire.

A l'heure actuelle, aucun plan de restauration à l'échelle du linéaire n'est encore envisagé. Si tel était le cas, ces différents points de questionnement seraient susceptibles de limiter la réflexion (questions de la réversibilité des processus, de la sensibilité du linéaire à l'ajustement et de la segmentation du linéaire en sous-tronçons).

Afin d'apporter des éléments de réponse à ces points de questionnement, l'objectif de cette thèse est de **reconstituer la trajectoire d'évolution de la dynamique fluviale de la Garonne à l'échelle de la Garonne toulousaine (linéaire de 90 km de longueur) et sur une période de temps pluriséculaire.**

Pour atteindre cet objectif, la démarche méthodologique mise en œuvre repose sur la complémentarité chronologique et spatiale des sources mobilisées, associant approche géohistorique (analyse des documents cartographiques historiques) et approche stratigraphique (analyse de données de terrain recensées sur plusieurs paléochenaux de la Garonne).

Conclusion de la Partie 1

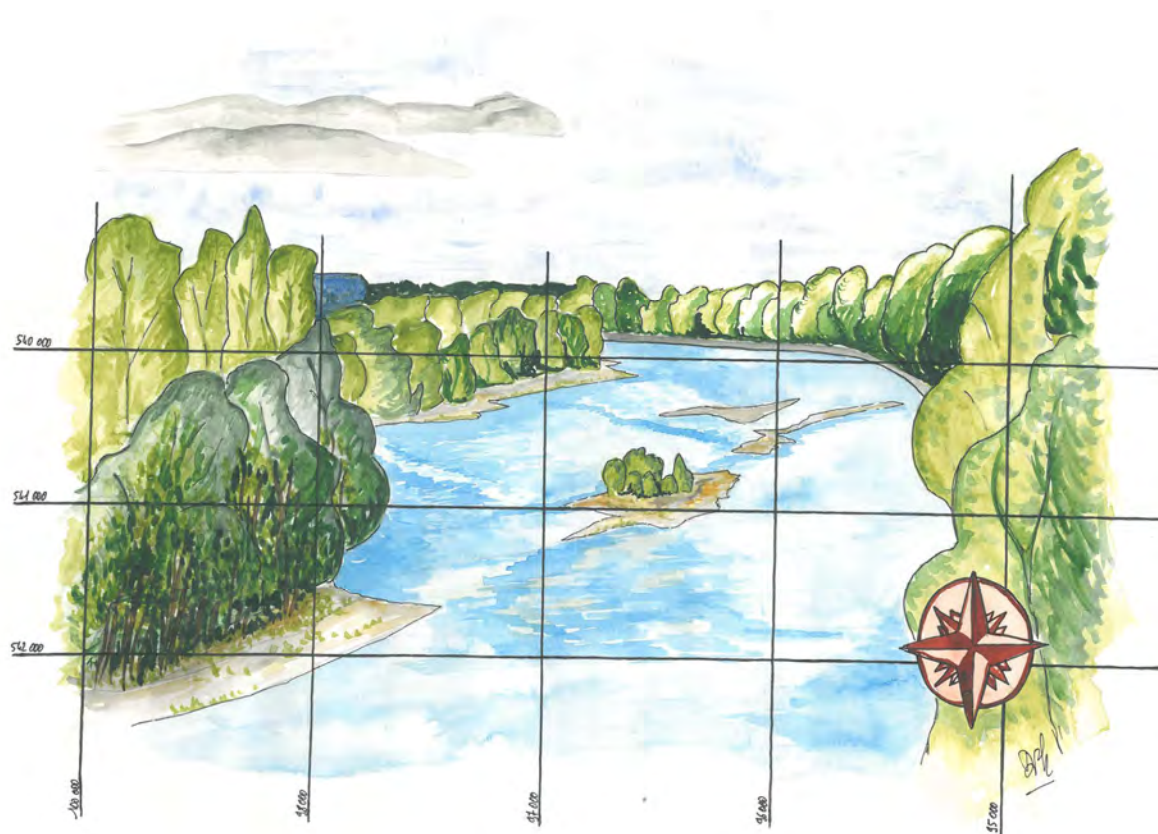
En Europe et plus largement à l'échelle planétaire, la plupart des hydrosystèmes fluviaux, jusque là marqués par une diversité et une richesse spécifique et paysagère particulières, représentent aujourd'hui des milieux menacés. Outre l'altération directe des écosystèmes par différents phénomènes de nature anthropique (extension urbaine, propagation d'espèces invasives, etc.), une altération du fonctionnement hydro-sédimentaire des cours d'eau a été reconnue par de nombreux chercheurs. Ce phénomène se traduit principalement par une incision et une contraction des lits fluviaux, qui s'accompagne d'une série d'impacts sur les écosystèmes environnants. En résulte une atteinte aux services écosystémiques rendus par le fleuve aux sociétés, notamment une perte de biodiversité considérable. Ce changement fluvial concorde principalement avec la *grande accélération* de la seconde moitié du XX^e siècle (susceptible de correspondre à l'*Anthropocène* selon les définitions), qui a notamment vu grandir le nombre de barrages, la longueur cumulée de digues et les tonnes de granulat extraits du fond des lits. Ces changements s'inscrivent généralement dans une tendance évolutive à plus long terme, marquée par le début des grands aménagements hydrauliques, la reforestation des versants et la transition climatique entre Petit Âge Glaciaire (PAG) et Réchauffement Global (RG) à la fin du XIX^e siècle / au début du XX^e siècle. Nous entrons maintenant dans l'ère de la restauration, marquée par la volonté des sociétés occidentales, notamment européennes, de réparer le mal causé en rétablissant la biodiversité des zones humides et aquatiques, les paysages fluviaux, ou plus ponctuellement, la dynamique hydro-sédimentaire des cours d'eau (restauration hydromorphologique).

A cette échelle européenne, la Garonne forme le plus grand estuaire après sa confluence avec la Dordogne (la Gironde). Elle constitue par ailleurs le quatrième cours d'eau français en termes de longueur écoulée en France et de surface du bassin versant. Avec un écoulement de 647 km de longueur entre les Pyrénées centrales et l'océan atlantique, elle représente aussi le principal cours d'eau du quart SO de la France. Au sein de ce bassin, la portion dite *Garonne toulousaine* correspond à un linéaire de 90 km de longueur entre la confluence de l'Ariège à Toulouse-Portet et la confluence du Tarn à Malause. Ce linéaire représente aujourd'hui la portion garonnaise la mieux renseignée, sur laquelle les mêmes processus d'incision et de chenalisation que ceux observés à l'échelle européenne ont été identifiés depuis les années 1960. Ces processus ont été mis en relation avec une série de facteurs de nature anthropique, principalement les extractions industrielles de granulat en lit mineur entre les années 1960 et les années 1980, ainsi que la campagne de protection des berges dans le département du Tarn-et-Garonne, menée entre 1960 et 1984. Depuis plusieurs décennies, différentes démarches de restauration sont mises en œuvre le long de la Garonne toulousaine. Toutefois la restauration hydromorphologique ne représente qu'une part réduite des initiatives.

Plusieurs points de questionnement concernant la trajectoire historique de la Garonne toulousaine restent aujourd'hui en suspens, tels que : l'amorce des processus, susceptible d'être antérieure à la seconde moitié du XX^e siècle ; les facteurs de contrôle impliqués dans la dynamique actuelle ; le style fluvial au plus fort du PAG / à l'amorce de la grande accélération ; ou encore la distribution spatiale des processus géomorphologiques le long du linéaire. Autant de questions qui limiteraient la réflexion en cas de mise en œuvre d'un plan de restauration hydromorphologique à l'échelle du linéaire. L'objectif de cette thèse est donc d'apporter des éléments de réponse à ces points de questionnement en proposant une reconstitution de la trajectoire d'évolution de la dynamique fluviale de la Garonne toulousaine sur une échelle de temps pluriséculaire. Pour cela, une approche croisée sources cartographiques (approche géohistorique) / données de terrain (analyse stratigraphique menée sur plusieurs paléochenaux) est mise en œuvre, qui repose sur la complémentarité chronologique et spatiale des sources mobilisées.

Partie 2 – Évolution en plan du linéaire fluvial de la Garonne toulousaine au cours de la période 1750-2000 : analyse des documents cartographiques historiques

Cette deuxième partie présente le volet de l'étude axé sur les documents cartographiques historiques (approche géohistorique). Le premier chapitre (chapitre 4) présente la démarche méthodologique mise en œuvre pour étudier l'évolution de la dynamique fluviale de la Garonne toulousaine à partir des cartes historiques. Le deuxième chapitre (chapitre 5) expose les différents résultats obtenus. Le troisième chapitre (chapitre 6) propose une synthèse des différents modèles de fonctionnement hydro-sédimentaire identifiés au sein du linéaire, ainsi que des processus et phases d'ajustement.



Philippe et Delphine Valette

Chapitre 4. - Démarche méthodologique mise en œuvre pour l'analyse des documents cartographiques historiques

L'analyse des documents cartographiques historiques proposée dans cette étude repose en grande partie sur un essai méthodologique, qui a récemment fait l'objet d'une publication dans la revue *Geomorphology* (David et al., 2016). Une série d'indices morphométriques a été calculée le long du linéaire à chaque date, afin de construire une base de données géomorphométrique diachronique. Ces données ont fait l'objet d'une analyse statistique à la fois multivariée et diachronique, qui a permis d'établir une *typologie dynamique des formes fluviales*. A partir de cette typologie, le chenal a été découpé en zones homogènes et chacune a fait l'objet d'une analyse qualitative des formes et ajustements fluviaux.

Ce chapitre présente les étapes de la démarche mise en œuvre dans son intégralité (fig. 4.1). Nous proposons d'abord un inventaire critique des documents cartographiques recensés (1), puis une présentation de la méthode d'intégration de ces documents sous SIG (2). Le mode de segmentation de la basse plaine en tronçons de mesure de 1 km de longueur est ensuite explicité (3) et la méthode de calcul des indices morphométriques est détaillée (4). Les traitements statistiques mis en œuvre pour analyser la base de données ainsi générée sont ensuite présentés (5) ainsi que la démarche d'interprétation des résultats spatialisés (6). Ce chapitre est enfin complété par une discussion sur les apports et limites d'une approche basée sur des sources historiques (7).

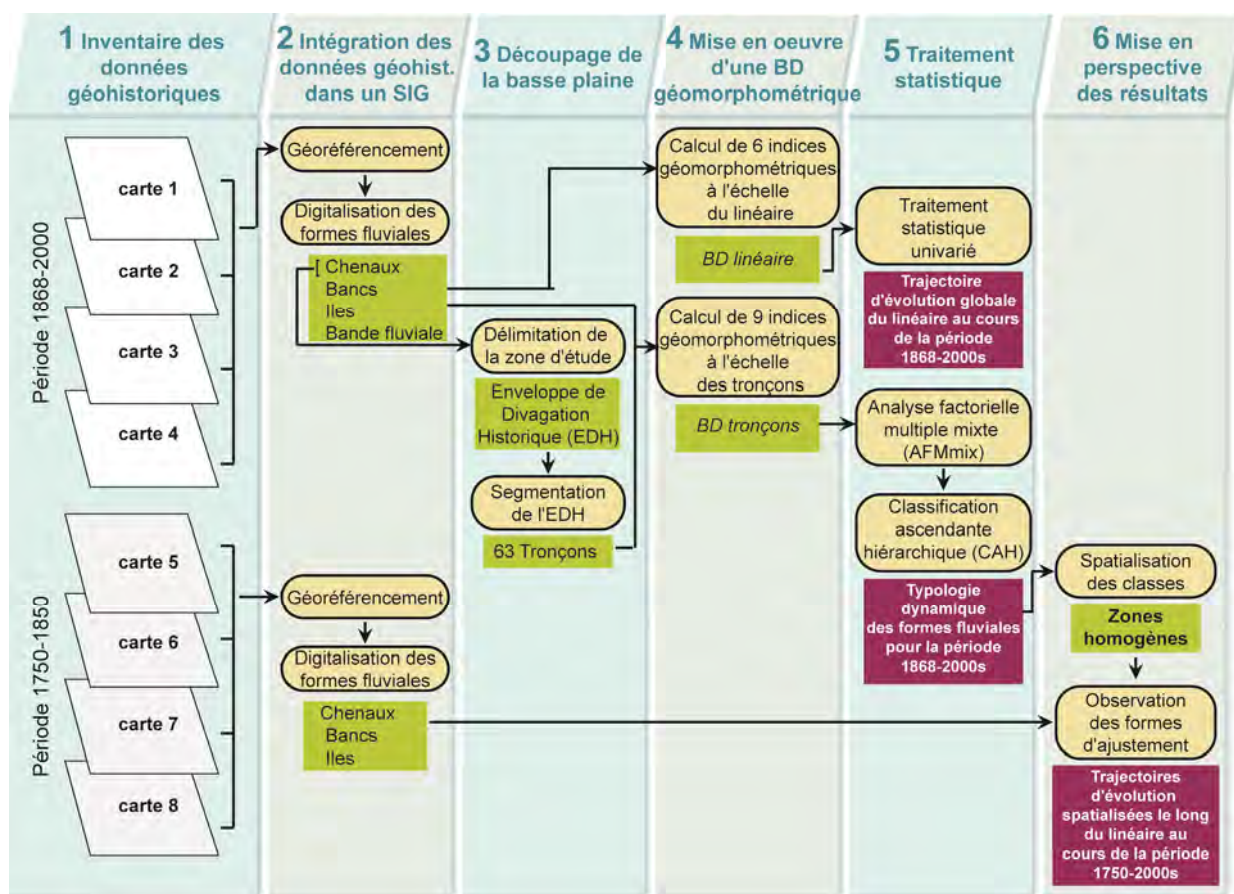


Figure 4.1 : Représentation schématique de la démarche méthodologique adoptée pour analyser l'évolution de la dynamique fluviale garonnaise à partir de documents cartographiques historiques. Les données intermédiaires sont représentées par un cadre vert ; les principaux résultats sont représentés par un cadre violet.

4.1. Inventaire des données géohistoriques

Cet inventaire a bénéficié des travaux de dépouillement de P. Valette (2002 ; 2004), réalisés au sein de différentes archives (nationales, départementales, des Voies Navigables de France et des Directions Départementales du Travail - Fig. 4.2). Il a été complété par des recherches au sein des archives universitaires (cartothèque de l'Université Toulouse II Jean Jaurès) et des archives municipales (archives.toulouse), ainsi que par quelques documents supplémentaires fournis par la cartothèque de l'IGN (Fig. 4.2). Un corpus documentaire comptant 12 représentations de la Garonne entre Toulouse et la confluence du Tarn sur la période comprise entre le début du XVIII^e siècle et les années 2000 a ainsi été établi (Fig. 4.2).

Ce corpus comprend trois types de documents (Fig. 4.2) : 1) les cartes centrées sur le cours de la Garonne réalisées aux XVIII^e et XIX^e siècles, souvent dans une optique d'aménagement du lit ; 2) les cartes d'Etat Major réalisées aux XIX^e et XX^e siècles à vocation plus générale et 3) les cartes topographiques récentes de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). La qualité de ces documents est hétérogène et diminue globalement avec l'ancienneté des sources, en raison de la diversité des objectifs et des techniques topographiques utilisées aux dates de levée.

| Date de levé / révision | | Source | Auteur | Echelle | Couverture |
|-------------------------|------------|-----------------|---------------------------|----------|--------------------------------|
| 12 | | | | | |
| 11 | 20002-2006 | IGN | IGN (scan25) | 1:25 000 | Totale |
| 10 | 1971-1978 | UT2J - IGN | IGN | 1:25 000 | Totale |
| | 1950 | UT2J | IGN | 1:10 000 | Anecdotique (Grenade) |
| | 1948-1949 | UT2J | IGN | 1:20 000 | Partielle (Toulouse / Grenade) |
| 9 | 1940-1941 | *DDT82 | IGN | 1:5 000 | Partielle (Grenade / Tarn) |
| | 1908-1909 | UT2J | Etat-Major | 1:50 000 | Partielle (Finhan / Tarn) |
| 8 | 1900-1908 | UT2J | Etat-Major | 1:80 000 | Partielle (Toulouse / Finhan) |
| 7 | 1868 | *AN - VNF - ADs | Anonyme | 1:10 000 | Totale |
| 6 | 1862 | *AD82 | Ponts et Chaussées | ? | Partielle (Grenade / Tarn) |
| 5 | 1848-1850 | UT2J | Etat-Major | 1:40 000 | Totale |
| 4 | 1833 | *AN | Anonyme | ? | Totale |
| 3 | 1810 | *AD33 | Anonyme | ? | Totale |
| | 1777-1789 | AM | Carla de Puilaureon | ? | Anecdotique (Toulouse) |
| 2 | ~1750-1770 | *VNF | Anonyme | ? | Partielle (Blagnac / Cordes) |
| 1 | 1755 | *AN | Villacrose | ? | Totale |
| | 1716-1717 | *AD78 | Matis, cartographe du roi | ? | Totale |

□

 Cartes topographiques IGN récentes

■

 Cartes d'Etat-Major des XIX^e et XX^e siècles

■

 Cartes centrées sur le cours de la Garonne des XVIII^e et XIX^e siècles

AD : Archives départementales

AM : Archives municipales (www.archives.toulouse.fr)

AN : Archives nationales

DDT : Direction départementale des territoires

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

UT2J : Université Toulouse Jean-Jaurès

VNF : Voies navigables de France

33 : Gironde

78 : Yvelines

82 : Tarn-et-Garonne

* : Documents fournis par P. Valette (2002, 2004)

Figure 4.2 : Inventaire des cartes du corpus documentaire.

4.1.1. Les représentations du cours de la Garonne réalisées aux XVIII^e et XIX^e siècles

Les auteurs et les échelles des documents antérieurs à la seconde moitié du XIX^e siècle sont souvent inconnus (Fig. 4.2) et la qualité des levés difficile à évaluer. De plus, ces documents sont rarement empruntables et ont donc été photographiés. Exceptées la carte anonyme de 1868 et la carte de 1777-1789 de Du Carla de Puilauron, qui ont pu être scannées, les documents antérieurs à la seconde moitié du XIX^e siècle sont donc souvent difficiles à géoréférencer et leur utilisation en est de ce fait limitée. Le corpus moderne compte sept documents ou groupes de documents de ce type.

4.1.1.1. La carte de Matis (1716-1717)

La carte la plus ancienne dont nous disposons (Fig. 4.3), représente le cours de la Garonne entre Montréjeau (Haute-Garonne - 31) et Bordeaux (Gironde - 33). Elle a été réalisée entre 1716 et 1717 par Matis, cartographe du roi, dans le but de permettre le flottage et la navigation nécessaires à l'alimentation de Versailles en marbre (Julien, 2005). Cette carte se compose de huit planches dont deux couvrent le linéaire de Toulouse à la confluence du Tarn. La localisation des lieux et leurs toponymes sont imprécis et les formes fluviales ne sont pas représentées de manière exhaustive. Seuls les éléments susceptibles de gêner la navigabilité du lit apparaissent.

4.1.1.2. La carte de Villacrose (1755)

La carte dite de Villacrose (Fig. 4.4) compte deux planches qui couvrent le lit de la Garonne de Toulouse (31) à Langon (33). La planche qui couvre notre linéaire d'étude a été réalisée en 1755. Ce document a été commandé par le marquis de Caraman afin de justifier un projet de construction de canal latéral à la Garonne en continuité avec le canal du Midi, dont il était l'un des principaux propriétaires. Les chemins et communes sont représentés, toutefois les communes sont désignées par des éléments figuratifs, sans représentation fidèle de l'organisation du bâti. La position du lit de la Garonne et la position des îles semblent cohérentes au regard des autres documents de l'époque. Toutefois les angles et distances ne sont pas rapportés avec précision.

4.1.1.3. La carte anonyme des années 1750-1770 et la carte de Du Carla de Puilauron des années 1777-1789

La carte des années 1750-1770 (Fig. 4.5) représente le lit de la Garonne dans les départements de la Haute-Garonne (31) et du Tarn-et-Garonne (82) mais ne couvre pas la totalité de notre linéaire d'étude. Seule la portion comprise entre Blagnac (31) et Cordes-Tolosanne (82) est représentée, sur une longue planche unique aquarellée. Ni la date, ni l'auteur de ce document ne sont connus. Il a été attribué à la seconde moitié du XVIII^e siècle par P. Valette (2004) sur comparaison du tracé de la Garonne avec d'autres plans historiques. Les communes semblent représentées dans de bonnes proportions mais le talus de terrasse et les limites du chenal sont approximatifs. De plus, le document est en mauvais état, ce qui augmente encore son imprécision. Le niveau de détail est toutefois important : bancs, îles, moulins, projets d'aménagements fluviaux, type d'occupation du sol, chemins, ruisseaux, limites administratives, etc., ont été rapportés, ce qui représente une source d'information rare pour l'époque et donc précieuse.

Nous avons choisi de compléter la carte anonyme de 1750-1770 par l'un des plans de Toulouse produits au cours de la seconde moitié du XVIII^e siècle : le plan signé "Du Carla de Puilaureon", attribué à la période 1777-1789 et scanné par les archives municipales de Toulouse (Fig. 4.5). Cette carte s'accompagne d'une table des renvois des lieux remarquables et d'une table des renvois pour les rues. Ces différents lieux semblent localisés de manière précise, ce qui laisse penser que le fleuve, au centre de la ville, est lui aussi fidèlement représenté.

4.1.1.4. La carte anonyme de 1810

La carte disponible dessinée en 1810 (Fig. 4.6) a été réalisée pour servir de support à la rédaction d'un projet d'amélioration de la navigation, ordonné par décret en 1808. Ce document se compose de deux planches aquarellées, dont la première couvre le lit de la Garonne de Toulouse à la limite départementale de la Haute-Garonne (31) et la seconde de la limite départementale du Tarn-et-Garonne (82) jusqu'à la confluence du Tarn. Le lit du fleuve est l'objet central, autour duquel un parcellaire grossier est représenté à titre décoratif. Ce parcellaire est traversé par un réseau de routes qui relient quelques communes, dont la position semble approximative, de même que celle du talus de terrasse. Les îles et les bancs sont représentés distinctement et le tracé d'un ancien chenal apparaît en filigrane. Des moulins à neufs et des bacs sont aussi représentés dans le chenal.

4.1.1.5. La carte anonyme de 1833

La *carte de la Garonne entre le pont de Toulouse et celui de Bordeaux* dessinée en 1833 à des fins inconnues (Fig. 4.7), se compose de 25 planches, dont sept couvrent le linéaire compris entre Toulouse et la confluence du Tarn. Cette carte est centrée sur le lit du fleuve et accorde peu d'importance à la plaine, bien que les communes et les routes qui les relient soient positionnées avec précision. Une légende en dernière page liste les nombreux éléments représentés dans le lit de la Garonne : maigres, corrosions de berge, changements survenus après la crue de 1833, alluvions récentes, graviers anciens, végétalisation par plantation de jetins, épis, passes, projet de rectification, bancs à escarper, bacs et moulins à neufs (moulins flottants). Toutefois, aucune attention n'est portée à la végétation, ce qui rend difficile la différenciation entre îles et bancs.

4.1.1.6. La carte des Ponts et Chaussées de 1862

Le plan de la vallée de la Garonne réalisé en 1862 (Fig. 4.8) illustre un projet d'aménagement proposé par les services de l'Etat (Préfet et Ponts et Chaussées) au conseil général du Tarn-et-Garonne (82). Il ne couvre pas la totalité de notre linéaire d'étude mais se concentre sur la portion comprise dans le département en question. Les communes et lieux-dits sont représentés dans le détail et semblent positionnés de manière précise. De même, la représentation des formes fluviales paraît cohérente et précise. De nombreux bancs sont notamment visibles dans le lit. Le tracé des modifications proposées dans le projet de rectification du chenal est dessiné sur le lit initial et la limite de l'inondation de 1862 est indiquée dans la plaine. La principale limite de ce document, outre la couverture partielle du linéaire d'étude, est la mauvaise qualité du support : le papier utilisé est fragile et comporte de nombreux plis qui déforment l'image.

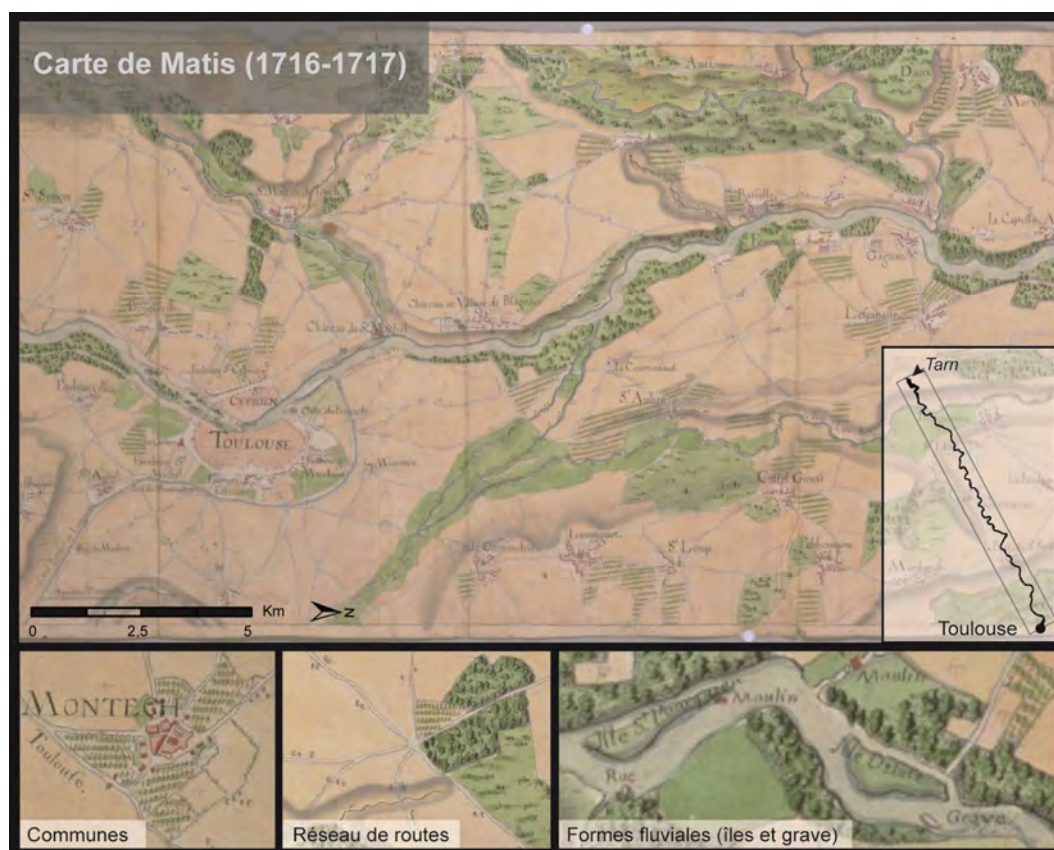


Figure 4.3 : Carte de Matis (1716-1717) - nord de Toulouse (Source : AD78).



Figure 4.4 : Carte de Villacrose (1755) - nord de Toulouse (Source : AN).

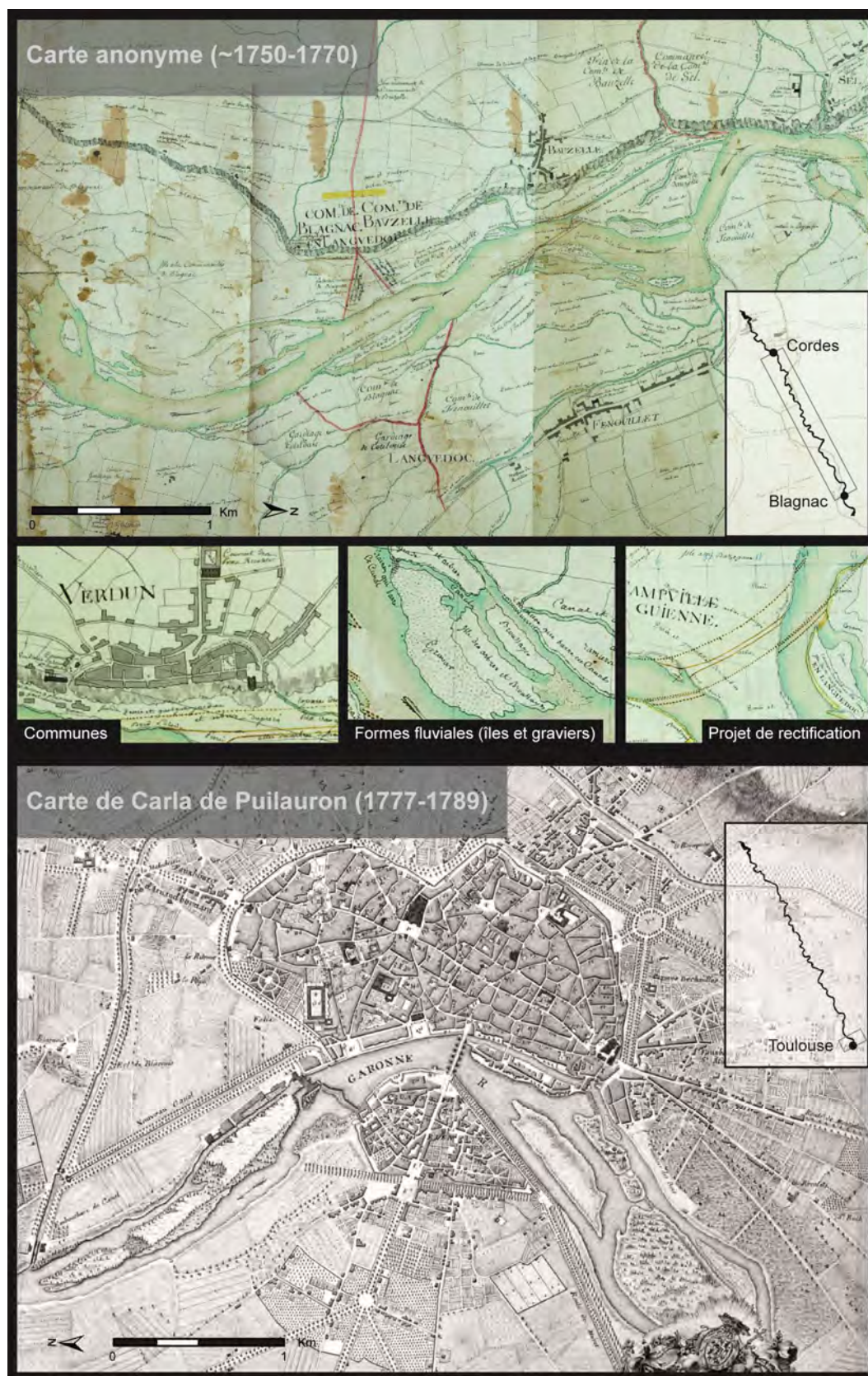


Figure 4.5 : Cartes de la seconde moitié du XVIII^e siècle. Carte anonyme des années 1750-1770 (en haut) - Blagnac (Source : VNF). Carte de 1777-1789 réalisée par Carla de Puilauron (en bas) - Toulouse (Source : AM).

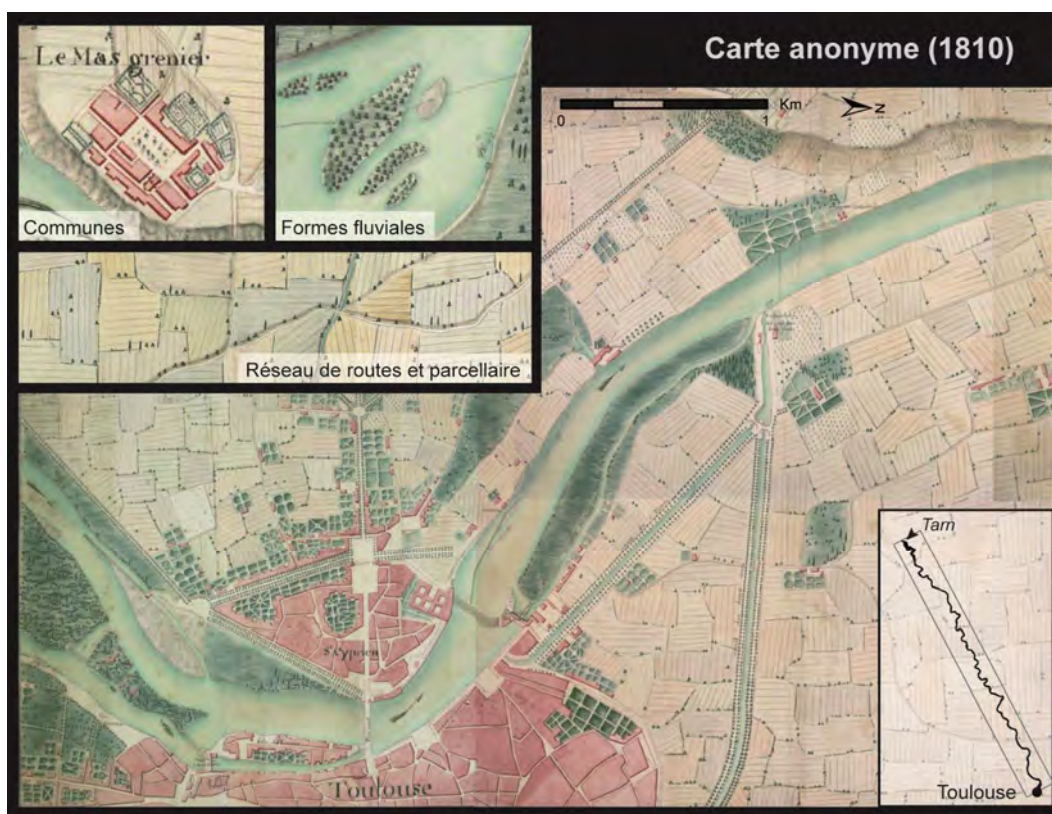


Figure 4.6 : Carte anonyme de 1810 - Toulouse (Source : AD33).

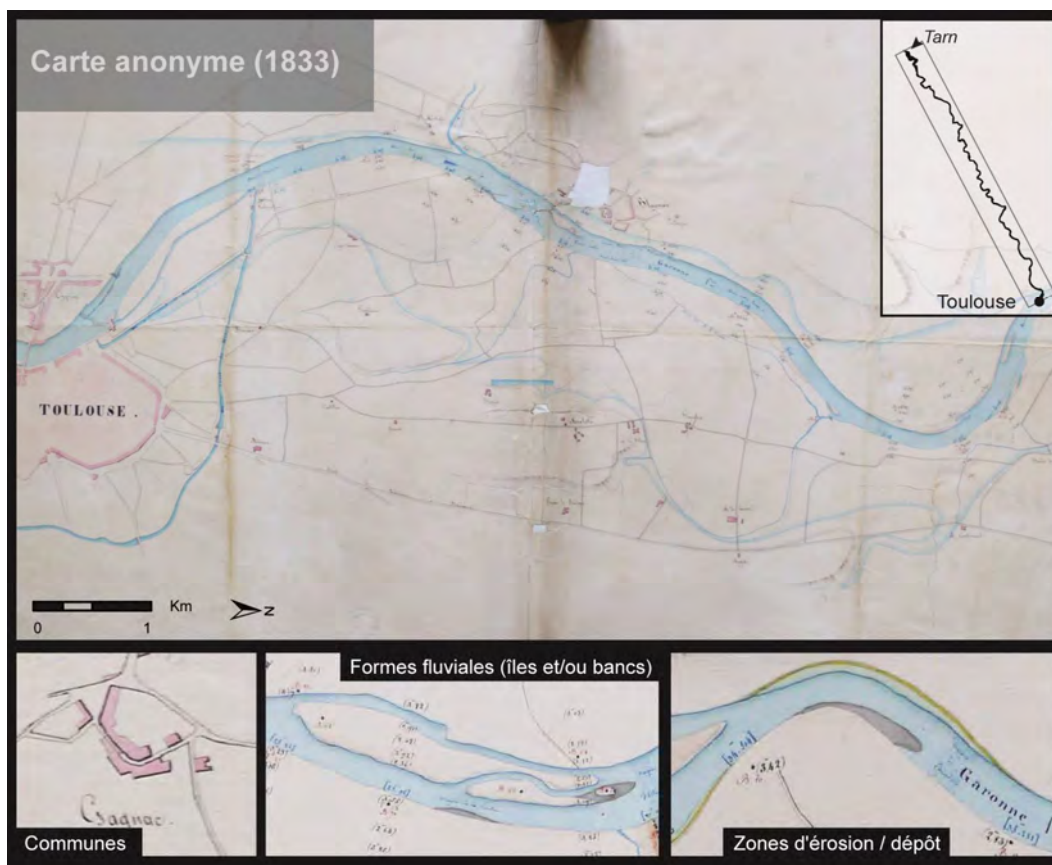


Figure 4.7 : Carte anonyme de 1833 - nord de Toulouse (Source : AN).

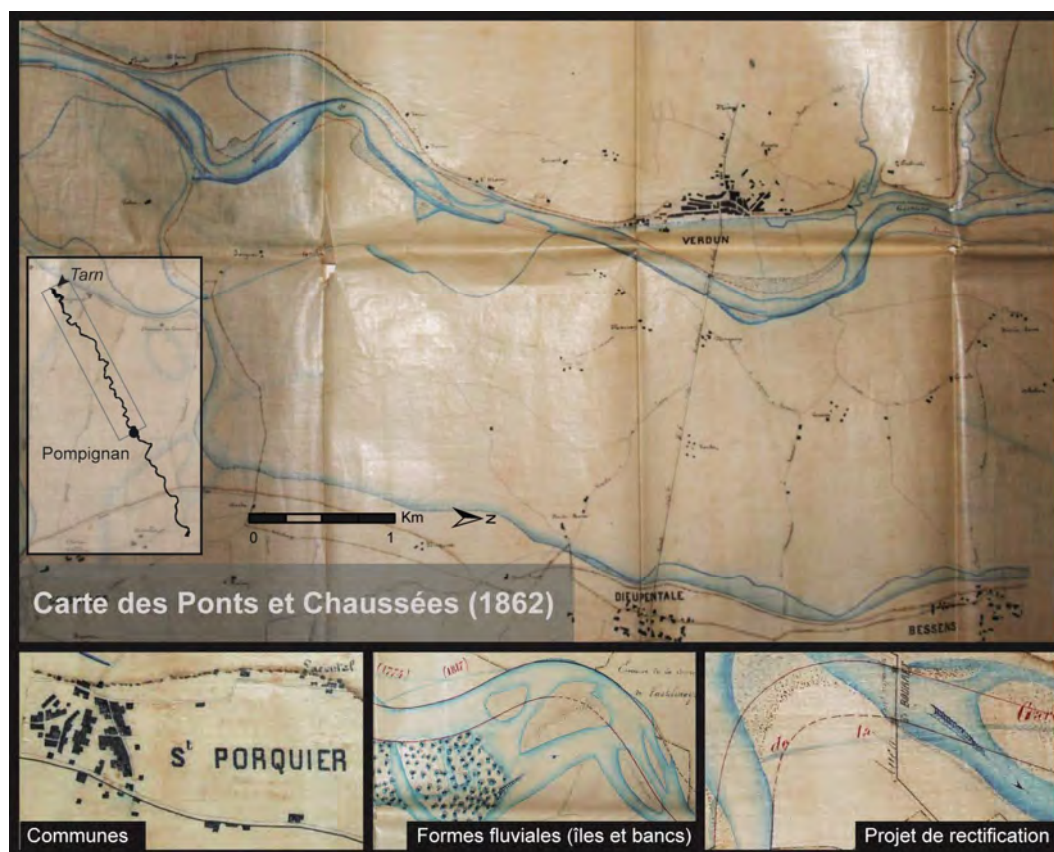


Figure 4.8 : Carte des Ponts et Chaussées de 1862 - secteur de Verdun-sur-Garonne (Source : AD82).



Figure 4.9 : Carte anonyme de 1868 - Toulouse (Source : AN, VNF, AD).

4.1.1.7. La carte anonyme de 1868

La carte anonyme de 1868 au 1:10000 (Fig. 4.9), qui couvre le cours de la Garonne entre Toulouse et Bordeaux, se distingue par sa qualité et son niveau de précision, nettement supérieurs aux autres cartes du XIX^e siècle. Ce document se compose de 27 planches monochromes, dont huit couvrent notre linéaire d'étude, sur lesquelles seul le canal latéral à la Garonne ouvert en 1856 est représenté en couleur. Un quadrillage assorti de coordonnées montre que les mesures ont été projetées avec précision mais aucune information concernant le système de projection utilisé n'est précisée. Les éléments de la plaine sont finement détaillés : communes, lieux-dits, routes et parcellaire. Le relief est figuré par des hachures et la limite de l'inondation de 1855 est représentée. Le lit du fleuve est tout aussi détaillé. On distingue les îles, les bancs, les maigres et différents aménagements : enrochements, épis et digues, ainsi que des bacs et moulins à nef.

4.1.2. Les cartes d'Etat-Major

Le linéaire fluvial compris entre Toulouse et la confluence du Tarn est couvert par deux séries de planches de la carte d'Etat-Major (première carte topographique d'ensemble du territoire français, réalisée par le dépôt de guerre et le corps des ingénieurs géographes sur ordonnance royale à partir de 1818), qui sont disponibles au format numérique. La première série date des années 1848-1850 et la seconde correspond à des révisions des années 1900-1909 (Figs 4.10 à 4.11). Cette carte, dont le contexte de création est bien documenté dans la littérature (Lefort, 2004 ; Chappart et Reynard, 2007 ; Costa et Robert, 2009 ; Brezinski, 2010 ; Plumejeaud et Vouloir, 2012 ; etc.), présente l'avantage d'avoir fait l'objet de mesures relativement précises et nombreuses (e.g., triangulation de la France et réutilisation des cadastres levés localement), ainsi que d'utiliser un système de projection connu (projection équivalente non conforme de Bonne ; coordonnées exprimées en degrés avec le méridien de Paris comme méridien d'origine). De nombreux éléments sont par ailleurs représentés, tel que le relief figuré par des hachures et points cotés, ou encore le bâti, rendu avec précision. Toutefois, le projet initial visant à couvrir la France entière, l'échelle des planches (de 1:40000 à 1:80000) s'avère insuffisante pour une représentation fidèle et précise des formes fluviales.

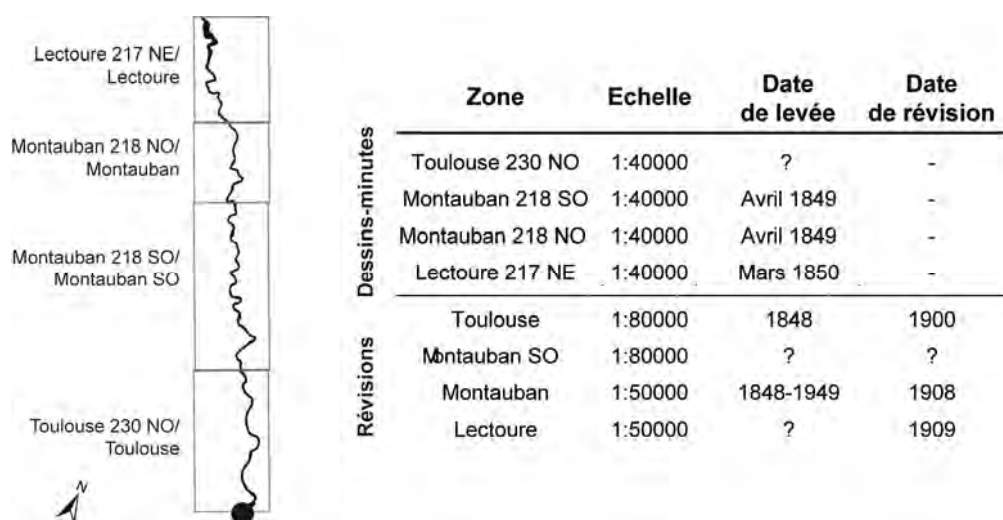


Figure 4.10 : Couvertures, échelles et dates de levée et de révision des cartes d'Etat-Major.

4.1.2.1. La carte d'Etat-Major des années 1848-1850

Quatre planches de la carte d'Etat-Major couvrent notre linéaire d'étude pour la période 1848-1850 (Figs. 4.10 et 4.11) : Toulouse 230 NO, Montauban 218 SO, Montauban 218 NO et Lectoure 217 NE. Ces planches, dites dessins-minutes, sont en couleur et ont été levées au 1:40000. Elles présentent une date précise de fin de travaux, inscrite par le chef de section. La planche de Toulouse fait exception car le document a bien été signé mais la date n'a pas été apposée. Toutefois, la planche de révision des années 1900-1909 couvrant la même zone spécifie que les levées initiales ont été réalisées en 1848.

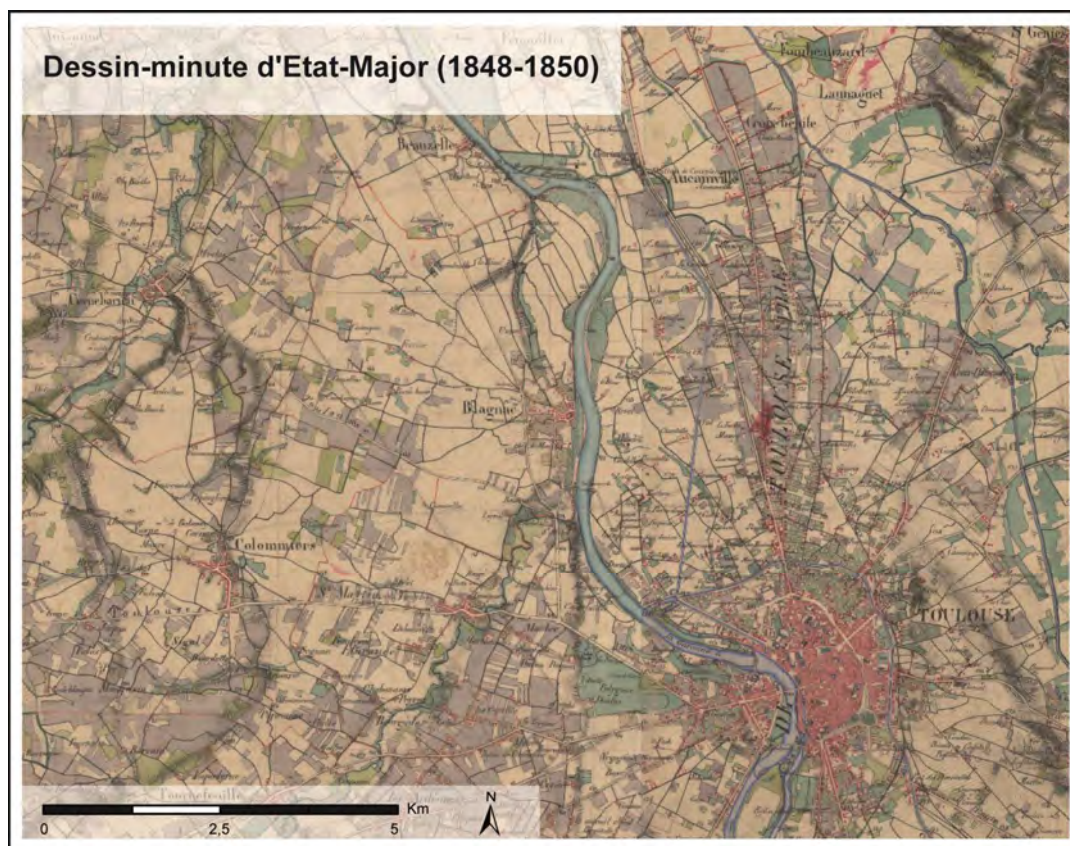


Figure 4.11 : Carte d'Etat-Major des années 1848-1850 - nord de Toulouse (Source : UT2J)

4.1.2.2. Les cartes d'Etat-Major des années 1900

Les minutes levées en couleur au 1:40000 au cours du XIX^e siècle étaient regroupées par quatre et gravées sur des planches de cuivre pour un tirage monochrome au 1:80000. Ces feuilles ont progressivement fait l'objet de révisions, d'abord de manière désorganisée puis de manière plus systématique à partir de 1889. Les cartes au 1:80000 ont par la suite été agrandies au 1:50000.

Quatre planches de révisions monochromes renseignent notre linéaire d'étude pour la période 1900-1909 (Figs. 4.10 et 4.12). Deux de ces planches (Toulouse et Montauban SO) sont au format 1:80000. La première a été révisée en 1900, alors que la seconde ne présente aucune date. Seule l'inscription "Type 1889" y est précisée. Selon certains auteurs, le "Type 1889" correspondrait à des révisions faites entre 1889 et 1898. Toutefois, les dates de révision des autres cartes dont nous disposons, elles aussi de "Type 1889", montrent que cette version de la carte d'Etat-Major peut être associée à des révisions plus tardives. Il existe donc une incertitude concernant la date de révision de la planche Montauban SO. Les

deux autres planches (Montauban et Lectoure) correspondent à des révisions au format 1:50000, réalisées en 1908 et 1909.

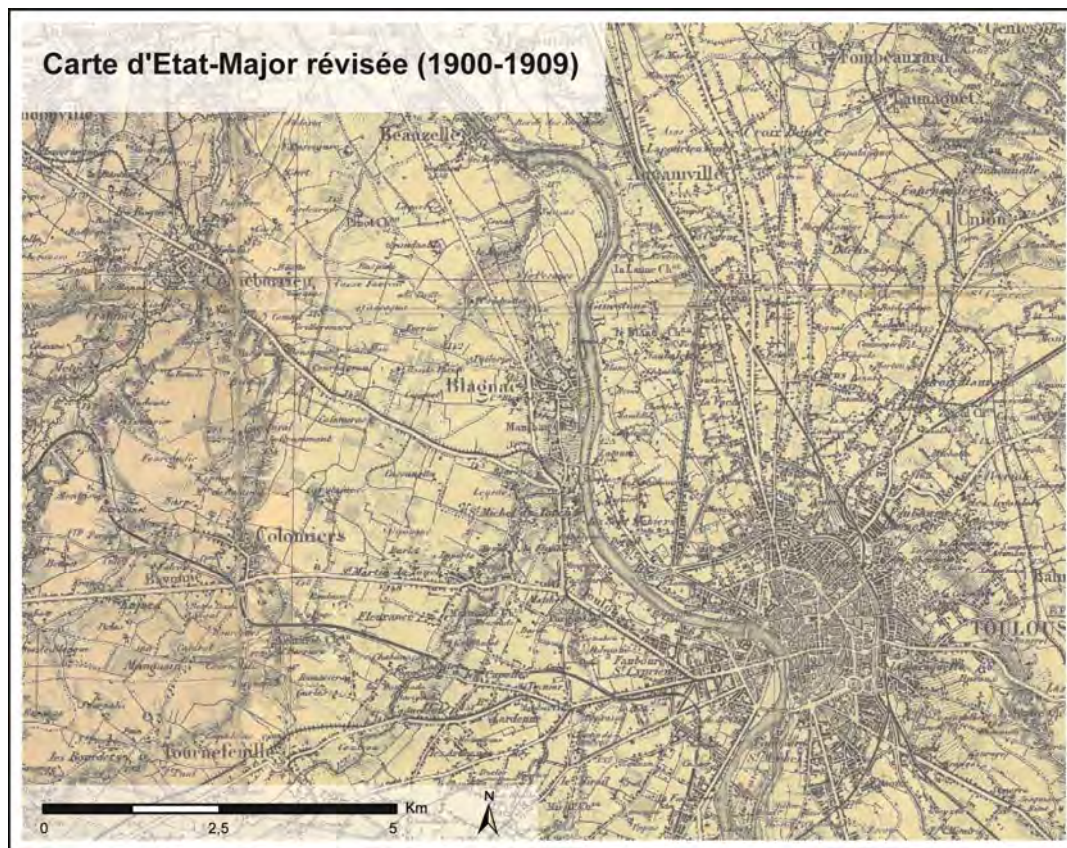


Figure 4.12: Carte d'Etat-Major des années 1900-1909 - nord de Toulouse (Source : UT2J).

4.1.3. Les cartes IGN

Grâce à la sophistication des techniques (e.g., couverture photographique aérienne) et à l'évolution des objectifs de cartographie (e.g., cartes touristiques), les cartes dressées par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) entre les années 1940 et les années 2000 sont les documents les plus précis disponibles pour le XX^e siècle. Avec des échelles allant principalement du 1:5000 au 1:25000, elles figurent les formes fluviales dans le détail. Cependant, elles ont rarement été réalisées dans le but de représenter spécifiquement le cours de la Garonne. De ce fait, aucune planche ne couvre la totalité du linéaire étudié, excepté le scan25® qui couvre la France entière. Nous avons donc choisi d'établir des groupes de planches représentant le linéaire au cours d'une même décennie. Toutes ont pu être scannées et ne présentent ainsi aucune déformation liée au support.

4.1.3.1. Les cartes IGN des années 1940

Le groupe de cartes IGN dit des années 1940 (Fig. 4.14) se compose de deux séries de planches.

Une première série de 75 dessins-minutes réalisés au 1:5000 sur papier calque couvre la partie tarn-et-garonnaise de la vallée de la Garonne (Fig. 4.14). Ces minutes ont été levées et dessinées pendant la seconde guerre mondiale - en 1940 et 1941 - et sont destinées à

être assemblées pour composer deux feuilles au 1:50000 : St Nicolas de la Graves et Montauban. Les coordonnées sont inscrites sur les marges en Lambert III zone Sud. Les formes fluviales, la topographie et les lieux-dits sont représentés avec des niveaux de détail et de précision exceptionnels.

La seconde série compte quatre planches au 1:20000, dressées, dessinées et publiées en 1948 et 1949 avec le même système de projection : Toulouse Ouest N8, Toulouse Est N5, Toulouse Ouest N4 et Toulouse Ouest N3 (Fig. 4.14). Cette série complète le linéaire d'étude en couvrant la portion haute-garonnaise du fleuve, de Toulouse jusqu'au nord de la commune de Merville. Les mesures, principalement réalisées par levés stéréotopographiques aériens et restituées à l'appareil Poivilliers, ont été complétées sur le terrain.

Quelques kilomètres de linéaire dans le secteur de Grenade ne sont couverts par aucune des deux séries. Une carte IGN supplémentaire au 1:10000 a donc été utilisée en complément. Une partie des levés a été réalisée dans les années 1940 et 1941 et révisée en 1950 et l'autre partie a été réalisée directement dans les années 1950 et 1951.

Nous disposons par ailleurs d'une série de photographies aériennes prises en 1950, couvrant la partie tarn-et-garonnaise du linéaire fluvial (Géoportail). Aucune différence de tracé n'est observée entre les planches cartographiques du début de la décennie 1940 et les photographies prises dix ans plus tard. La faiblesse de la dynamique fluviale au cours des années 1940 est confirmée par les données de débit disponibles pour cette période (HYDRO), qui révèlent des crues particulièrement faibles (Fig. 4.13). Ces différentes comparaisons nous permettent d'associer les cartes IGN présentées ci-dessus pour obtenir une vue représentative du lit de la Garonne au cours des années 1940, malgré les sept à neuf années d'écart entre les levés du secteur amont et celles du secteur aval.

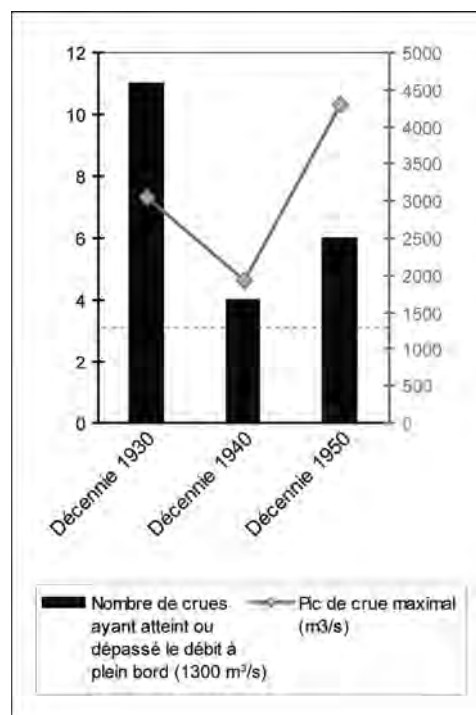


Figure 4.13 : Comparaison des crues de la décennie 1940 avec celles des décennies précédente et ultérieure. Le débit à plein bord considéré est 1300 m³/s. Il correspond à un temps de retour de 1,58 ans pour la période 1904-1993 (Steiger et al., 1998).

4.1.3.2. Les cartes IGN des années 1970

Le groupe de cartes IGN dit des années 1970 (Fig. 4.15) compte huit planches au 1:25000, levées entre 1971 et 1978 et dont certaines correspondent à des révisions des versions précédentes (1940-1941 et 1948-1950). Le système de projection utilisé est le même que pour les cartes des années 1940 (Lambert zone III). Toutefois, les planches Grenade (1-2, 3-4 et 7-8), St-Nicolas 3-4 et Montauban Ouest proposent en plus des coordonnées en Lambert zone II étendu.

Dans le cas de la décennie 1970, les crues n'apparaissent pas particulièrement faibles mais les photographies aériennes disponibles prises au début et à la fin de la décennie (Géoportail) montrent là encore une certaine stabilité du lit, qui nous permet d'associer les différentes planches abordées pour couvrir la période dite des années 1970.

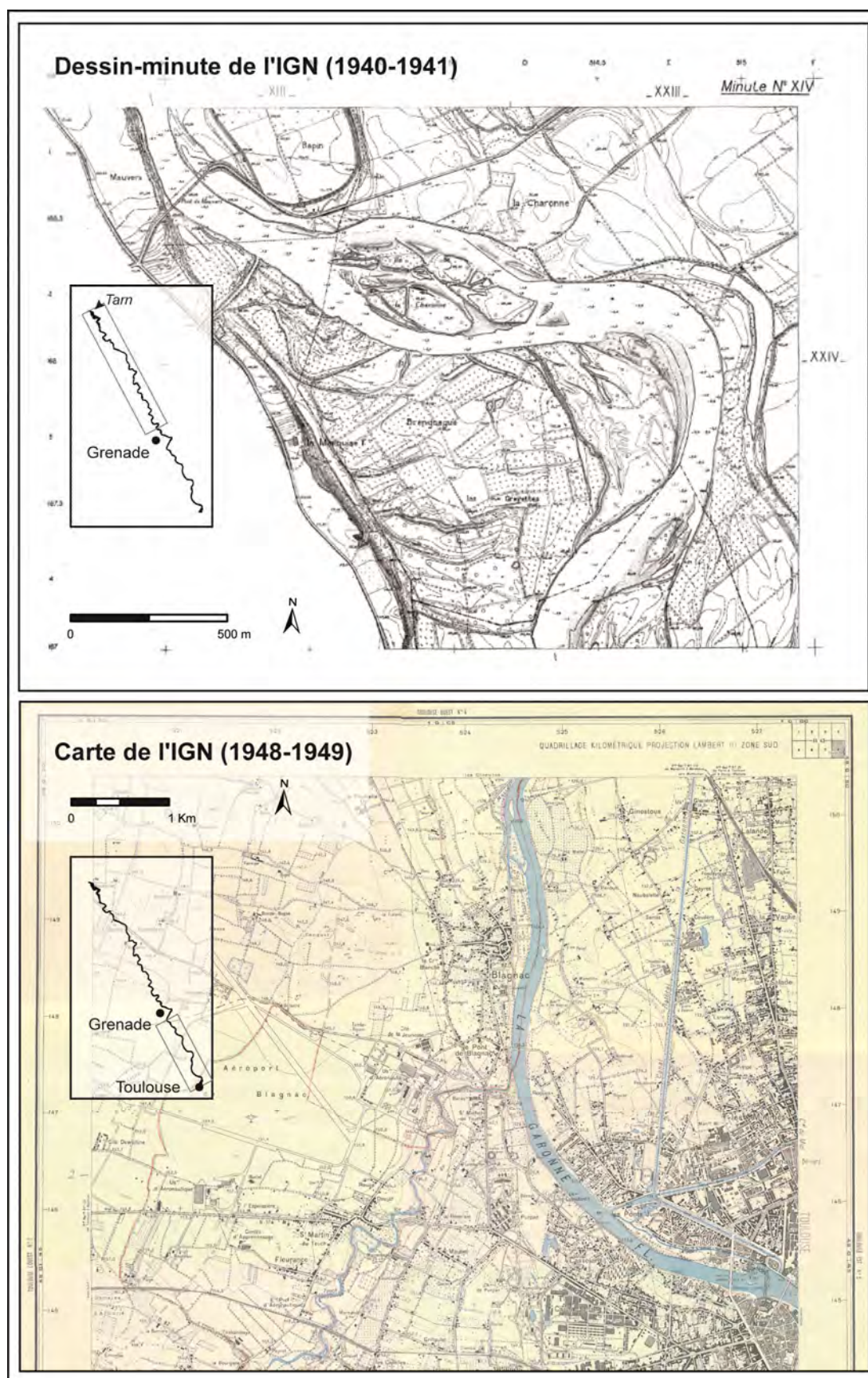


Figure 4.14 : Cartes IGN des années 1940. Dessin-minute des années 1940-1941 au 1:5000 (en haut) - secteur de Grisolles (Source : DDT82). Carte des années 1948-1949 au 1:20000 (en bas) - nord de Toulouse (Source : UT2J).

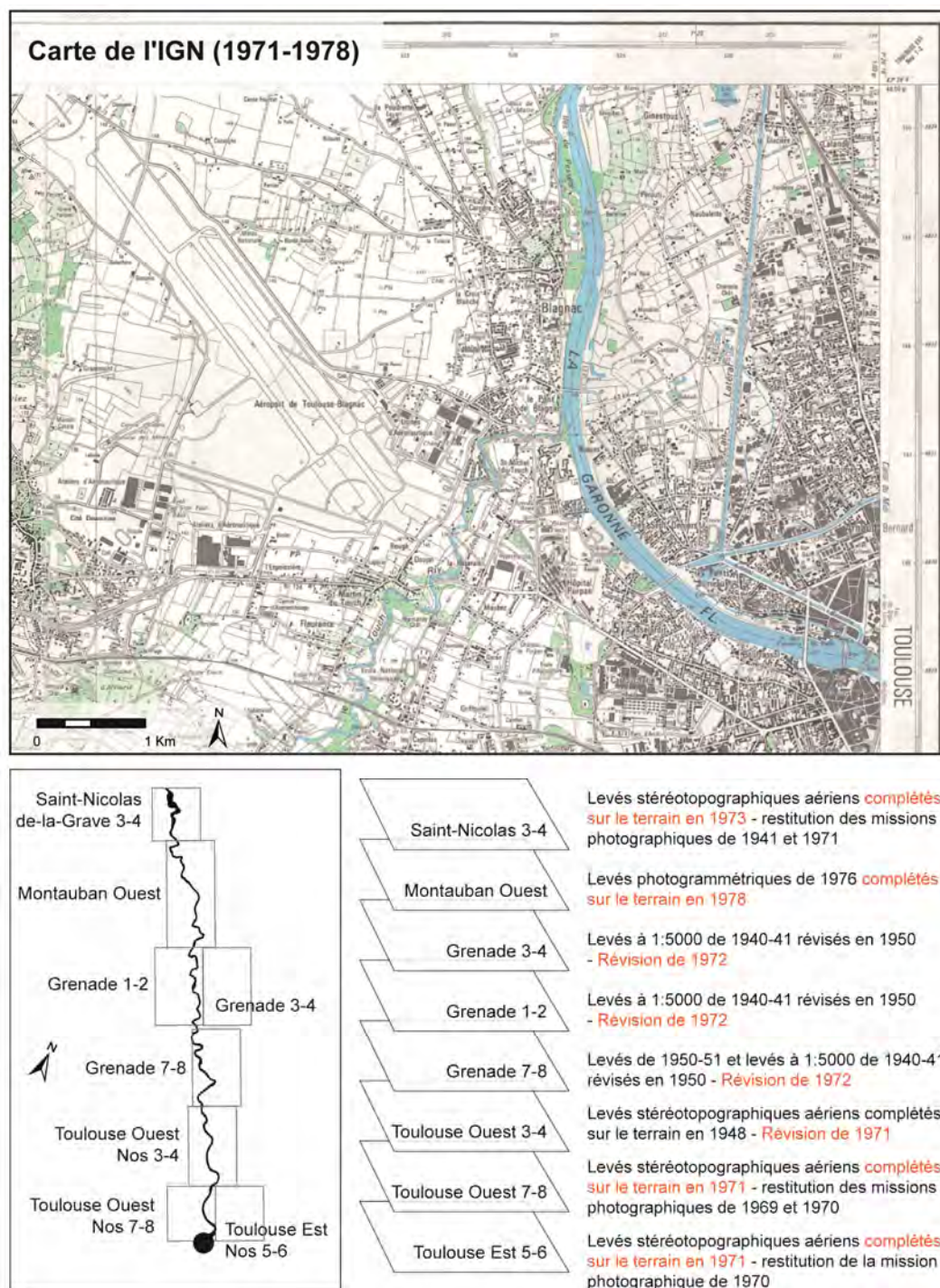


Figure 4.15 : Planche Toulouse Ouest 3-4 et dates/couvertures des différentes planches des années 1970 (Source : UT2J).

4.1.3.3. Le scan25® (années 2000)

Le groupe de cartes dit des années 2000 correspond au scan25® (carte topographique de la France au 1:25000 - Fig. 4.16), levé, géoréférencé et mis à disposition par l'IGN en Lambert-93. Le scan25® est révisé en moyenne tous les 12 ans. Les planches dont nous disposons ont été révisées entre 2002 et 2006.

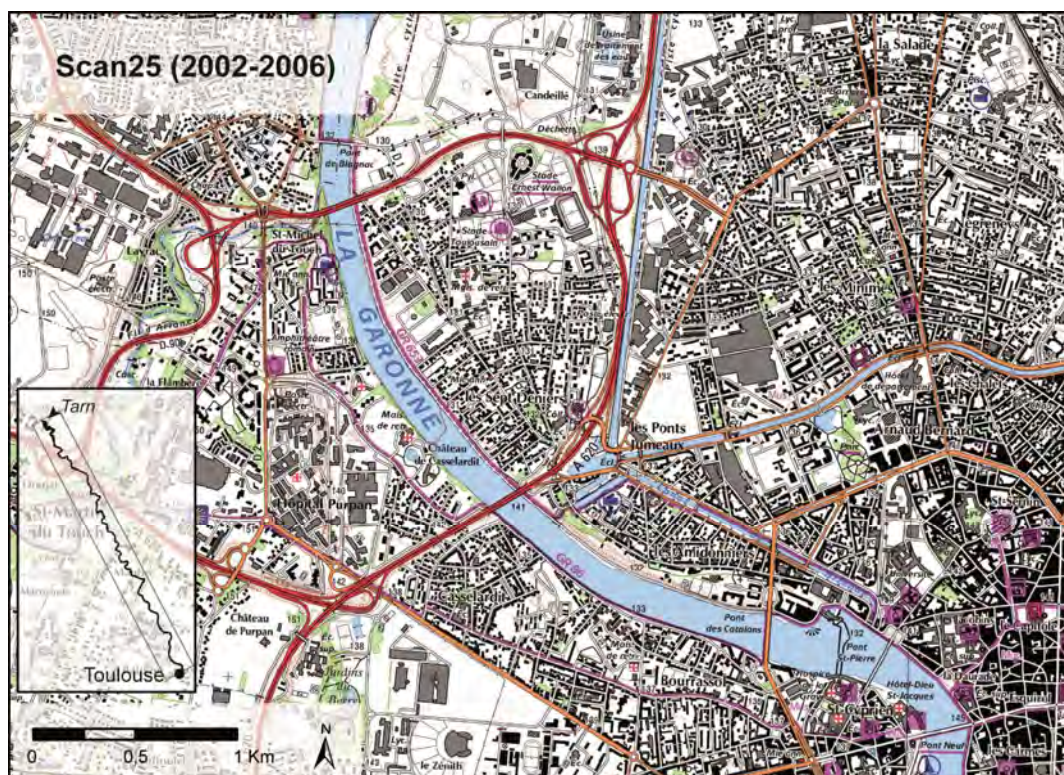


Figure 4.16 : Scan25® - Toulouse nord (Source : IGN, Scan25®).

4.2. Intégration des données géohistoriques dans un système d'information géographique (SIG)

Sauf quelques exceptions, les cartes recensées ont été intégrées dans un système d'information géographique (SIG) afin qu'elles puissent être comparées et que les formes fluviales fassent l'objet d'une analyse géomorphométrique. Cette intégration sous SIG s'est faite en deux étapes, avec : 1) le géoréférencement des planches et 2) la digitalisation des formes fluviales.

4.2.1. Géoréférencement

Les cartes du cours de la Garonne de Matis (1716-1717 - cf. 4.1.1.1) et Villacrose (1755 - cf. 4.1.1.2) ont été jugées trop imprécises et le support du plan des Ponts-et-Chaussées (1862 - cf. 4.1.1.6) de trop mauvaise qualité, pour être intégrés dans un SIG. Le scan25® étant déjà géoréférencé, huit des 12 cartes recensées ont donc fait l'objet d'un géoréférencement (ArcMap 10, polynôme de 1^{er} ordre - Table 4.1).

Deux types de traitement ont été effectués préalablement au géoréférencement (Table 4.1-(4)) : les planches de grande taille et qui contiennent un nombre important de points d'amer ont été découpées (D) en planches plus réduites afin d'optimiser la qualité du géoréférencement ; à l'inverse, les planches les plus anciennes et moins précises ont été assemblées (A) préalablement au géoréférencement (Inkscape) afin d'augmenter le nombre de points d'amer disponibles.

Lorsque le système de projection des cartes est connu et relativement récent (cartes IGN) les coordonnées x et y ont été renseignées directement dans le système de projection

initial (Lambert III zone sud), puis reprojetées en Lambert-93 (Table 4.1-(6) : x-y). Les dessins-minutes des années 1940-1941 ont toutefois dû être légèrement recalés, probablement en raison d'une différence de datum. Dans les cas où le système de projection est inconnu, les cartes ont été calées à partir d'un référentiel (le scan25®, ainsi que la carte de 1868 pour les cartes les plus anciennes - Table 4.1-(6) : scan25 et scan25+).

Seuls trois documents géoréférencés présentent une précision suffisante pour obtenir une erreur quadratique moyenne (RMSE) inférieure à 10 m avec un nombre de points significatif (> 0,5 point/km²) : la carte anonyme de 1868 et les cartes IGN des années 1940 et des années 1970 (Table 4.1-(9) et (10)). Ces documents ont servi à l'analyse quantitative de l'évolution du chenal. Les autres cartes ont été utilisées dans une approche plus qualitative.

| | Date (1) | Echelle (2) | Nbre planches (3) | Pré-tr. (4) | Nbre planches (5) | Géoref. (6) | Nbre points (7) | Surface (km ²) (8) | Nbre pts/km ² (9) | RMSE (10) |
|--|-------------|--------------------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|-----------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------|
| Scan25 | 2002-2006 | 1:25000 | 18 | - | - | - | - | - | - | - |
| Cartes IGN (1970s) | 1971-1978 | 1:25000 | 8 | D | 21 | x - y | 423 | 301 | 0,71 | [0,65-1,89] |
| Cartes IGN (1940s) | 1950-1951 | 1:10000 | 1 | D | 3 | x - y | 21 | 27 | 1,29 | [1,17-2,04] |
| | 1948-1949 | 1:20000 | 4 | D | 10 | x - y | 112 | 117 | 1,04 | [0,66-1,39] |
| | 1940-1941 | 1:5000 | 56 | - | 56 | scan25 | 167 | 506 | 3,03 | [1,11-6,33] |
| Carte d'Etat Major (1900s) | 1900-1909 | 1:50000 1:80000 | 4 | D | 12 | scan25 | 349 | 164 | 0,47 | [23-45] |
| Carte anonyme | 1868 | 1:10000 | 8 | D | 61 | scan25 | 370 | 555 | 1,50 | [3,86-14] |
| Carte d'Etat Major (1850s) | 1848-1850 | 1:40000 | 4 | - | 4 | scan25 + | 772 | 77 | 0,10 | [20-40] |
| Carte anonyme | 1833 | - | 14 | - | 14 | scan25 + | 266 | 156 | 0,59 | [21-45] |
| Carte anonyme | 1810 | - | 60 | A | 11 | scan25 + | 199 | 59 | 0,30 | [19-168] |
| Cartes de la 2e moitié du XVIIIe s. | 1777-1789 | - | 1 | - | 1 | scan25 + | 17 | 10 | 0,59 | 14,34 |
| | 1750-1770 | - | 25 | A | 11 | scan25 + | 152 | 67 | 0,44 | [22-106] |

Table 4.1 : Informations concernant le géoréférencement des cartes historiques. (1) date de levée ou de dernière révision ; (2) échelle de la carte ; (3) nombre initial de planches ; (4) prétraitement : découpage (D) ou assemblage (A) ; (5) nombre de planche après prétraitement ; (6) méthode de géoréférencement : par renseignement des coordonnées x et y (x - y) ou à partir d'un référentiel, pouvant être le scan25® (scan25) ou le scan25® et la carte de 1868 (scan25+) ; (7) nombre de points d'amer positionnés ; (8) Surface totale couverte par les planches géoréférencées ; (9) nombre de points au km² et (10) erreur quadratique moyenne (RMSE, en m).

4.2.2. Digitalisation des formes fluviales

Chacune des neuf planches géoréférencées (incluant le scan25®) a fait l'objet d'une digitalisation des composantes fluviales sous SIG (ArcMap 10 ; Fig. 4.17) en distinguant : 1) le chenal en eau, tel qu'il est délimité sur les cartes ; 2) les îles végétalisées, *i.e.* les dépôts alluviaux végétalisés qui séparent différents bras du lit ; 3) les bancs non végétalisés, *i.e.*, les bancs latéraux, centraux ou accolés à une île, représentés par le figuré sable mouillé ou

galet et 4) la bande fluviale, englobant la bande active (chenal principal et bancs), les chenaux secondaires et les îles. Le choix de ces éléments repose sur leur représentativité du fonctionnement hydro-sédimentaire du fleuve et sur leur simplicité, adaptée à une approche multi-sources.

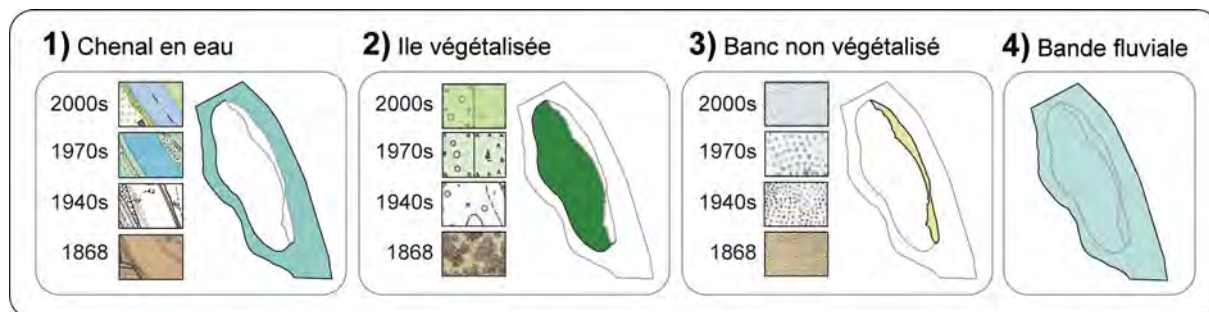


Figure 4.17 : Formes fluviales digitalisées et leurs légendes sur les cartes couvrant la période 1868-2000.

4.3. Segmentation de la basse plaine

Dans l'optique d'effectuer des mesures à intervalle régulier sur les formes fluviales digitalisées le long du linéaire (e.g., Ziliani et Surian, 2012 ; Alber et Piégay, 2011), la basse plaine a été segmentée en tronçons de 1 km de longueur sous SIG. Deux étapes ont été nécessaires à la définition de cette grille de mesure : 1) la délimitation de la zone d'étude et 2) sa segmentation à proprement parler.

4.3.1. Délimitation de la zone d'étude

Un premier travail de délimitation a été mené à l'échelle de toute la basse plaine afin d'englober la zone de migration du chenal la plus large possible. Pour cela, nous avons généré un modèle numérique de cours d'eau (MNCE) selon la méthode proposée par Rapinel (2012), qui consiste à soustraire à un modèle numérique de terrain classique (MNT, 25 m de résolution - IGN, BD ALTI®), un plan de référence représentatif de la pente générale du cours d'eau. De cette manière, les altitudes sont normalisées par rapport au niveau du chenal et le fond de vallée peut être extrait en délimitant la zone basse, caractérisée par des altitudes relatives inférieures à 10 m. Toutefois, cette unité spatiale ne s'est pas avérée pertinente pour notre étude en raison de la concentration des écoulements en marge du fond de vallée, le long du talus de terrasse rive gauche.

Afin d'obtenir un axe représentatif de la direction de l'écoulement, nous avons préféré travailler sur une zone d'étude plus concentrée autour de la zone de migration du chenal (Fig. 4.18). Nous avons ainsi choisi de délimiter l'enveloppe de divagation historique du chenal (EDH), englobant le linéaire aux quatre dates étudiées quantitativement (1868, 1940s, 1970s et 2000s), élargie sur un rayon de 100 m.

4.3.2. Segmentation de l'enveloppe de divagation historique (EDH)

L'enveloppe de divagation historique du chenal (EDH) a été subdivisée en tronçons de mesure fixes de 1 km de longueur, à partir de la méthode semi-automatique proposée par Alber et Piégay (2011). Cette méthode consiste à générer des polygones de Thiessen à partir de points positionnés tous les km le long de l'axe central de l'EDH². Si elle permet d'obtenir des polygones bien perpendiculaires à un axe, cette méthode présente toutefois l'inconvénient de générer des formes hétérogènes : dès lors que l'EDH forme un angle, une extrémité du polygone devient plus courte que l'autre, ce qui fait que la taille de la zone de mesure varie selon la position du chenal au sein du tronçon (Fig. 4.18-A). Pour pallier ce problème et permettre une surface de mesure constante d'une année sur l'autre malgré les migrations latérales du chenal, la méthode a été légèrement modifiée. L'axe central de l'EDH a été découpée en droites tangentes et les polygones de Thiessen ont été générés le long de ces lignes droites. De cette manière, ils sont géométriquement identiques et se superposent légèrement au niveau des points de croisement des lignes (Fig. 4.18-B). Enfin, un transect perpendiculaire à l'axe central de l'EDH a été ajouté au centre de chaque tronçon, afin de faciliter le positionnement de mesures ponctuelles au sein des tronçons (Fig. 4.18-B).

Les zones situées à proximité immédiate du centre historique de Toulouse ou de la confluence du Tarn n'ont pas été prises en compte dans l'étude car la forte anthropisation de ces secteurs est susceptible d'influencer les résultats de l'analyse. Au total, 63 tronçons (T1-T63) ont donc été créés (Fig. 4.18-C).

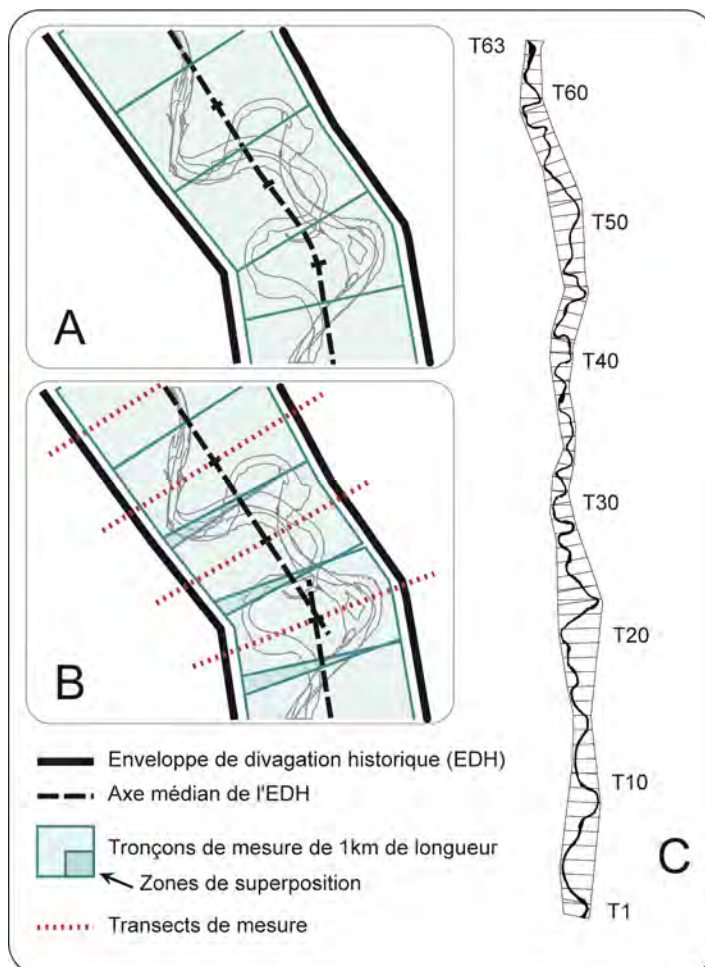


Figure 4.18 : Méthode de segmentation de la basse plaine en tronçons de mesure de 1 km de longueur. A - Méthode proposée par Alber et Piégay (2011). B - Génération des polygones de Thiessen à partir de lignes tangentes à l'axe médian de l'EDH. C - les 63 tronçons générés le long de la Garonne toulousaine.

² Il est aussi possible d'utiliser l'outil "Créer un index le long d'une entité linéaire" qui se trouve dans la toolbox "Outils de cartographie" > "Pages dynamiques" d'ArcGis pour générer des tronçons tous les km.

4.4. Mise en œuvre d'une base de données géomorphométrique

A partir des quatre cartes digitalisées les plus précises et les plus détaillées (1868, 1940s, 1970s et 2000s), deux bases de données géomorphométriques distinctes ont été générées sous SIG. La première a été réalisée à l'échelle des tronçons de mesure (*BD tronçons*), dans l'optique de réaliser une typologie dynamique des formes fluviales par traitement statistique multivarié. La seconde a été réalisée à l'échelle du linéaire (*BD linéaire*) dans l'optique de quantifier l'évolutive globale.

4.4.1. La BD tronçons

Neuf indices géomorphométriques ont été mesurés/calculés à l'échelle des tronçons de mesure (Fig. 4.19-1 à 9 et Table 4.2-*BD tronçons*).

Trois de ces indices concernent le chenal³ et correspondent à des mesures ponctuelles, réalisées une fois par tronçon (Fig. 4.19-A et Table 4.2-*BD tronçons*) :

- la largeur du chenal en eau (L_c , en m), *i.e.*, la somme des largeurs du chenal principal et des chenaux secondaires ;
- le nombre de chenaux secondaires (Q_c) ;
- la largeur de la bande fluviale (L_{bf} , en m).

Ces mesures ont été réalisées sur une ligne perpendiculaire à l'axe central d'écoulement du chenal principal (dans le cas de L_c et Q_c) ou sur une ligne perpendiculaire à l'axe central de la bande fluviale (dans le cas de L_{bf}). Afin que les mesures s'appliquent à des points fixes du cours d'eau, les lignes recoupent systématiquement le point de croisement entre l'axe central et le transect de mesure.

Deux des indices concernent les îles et bancs et correspondent à des mesures surfaciques (Fig. 4.19-B et Table 4.2-*BD tronçons*) :

- la surface totale en îles végétalisées au sein du tronçon (S_v , en km²) ;
- la surface totale en bancs non végétalisés au sein du tronçon (S_{nv} , en km²).

Les quatre autres indices concernent les *unités morphologiques* (Fig. 4.19-C et Table 4.2-*BD tronçons*). Cette unité a été proposée pour analyser la taille, la forme et la position des dépôts accumulés au sein du chenal sans tenir compte du niveau de végétalisation, *i.e.* en considérant une île et les bancs accolés à cette île comme un objet unique. Les valeurs retenues sont des valeurs moyennes :

- la taille/surface moyenne (S , en km²) ;
- le périmètre moyen (P , en km) ;
- la moyenne des plus proches distances à la berge (D , en m) ;
- l'indice de Gravelius moyen (G), qui donne une indication sur la circularité/l'allongement de l'unité morphologique.

Etant donné la qualité des documents cartographiques disponibles, d'autres variables auraient pu être ajoutées, telles que le taux de migration du chenal, le rayon de courbure ou encore la longueur d'onde des méandres. Le choix des indices présentés ci-dessus répond à plusieurs facteurs : 1) Comme nous souhaitons appréhender la dimension dynamique du chenal par le biais d'une analyse statistique multivariée intégrant la dimension temporelle, nous avons retenu des indices statiques et évité les indices inter-dates ; 2) Afin de permettre une analyse statistique basée sur des unités comparables, nous avons évité les indicateurs associés à des échelles variables, tels que les indices descriptifs des boucles de méandre ; 3) La perspective de reproduire la même démarche méthodologique sur la Garonne

³ Le calcul d'un indice de sinuosité a aussi été testé à l'échelle des tronçons de mesure mais cet indice n'a pas été retenu en raison de son faible poids dans l'analyse multivariée.

estuarienne (projets Adapt'eau et Gagilau) nous a poussé à éviter les indicateurs associés à un style fluvial particulier (*i.e.*, indices de méandrage ou de tressage).

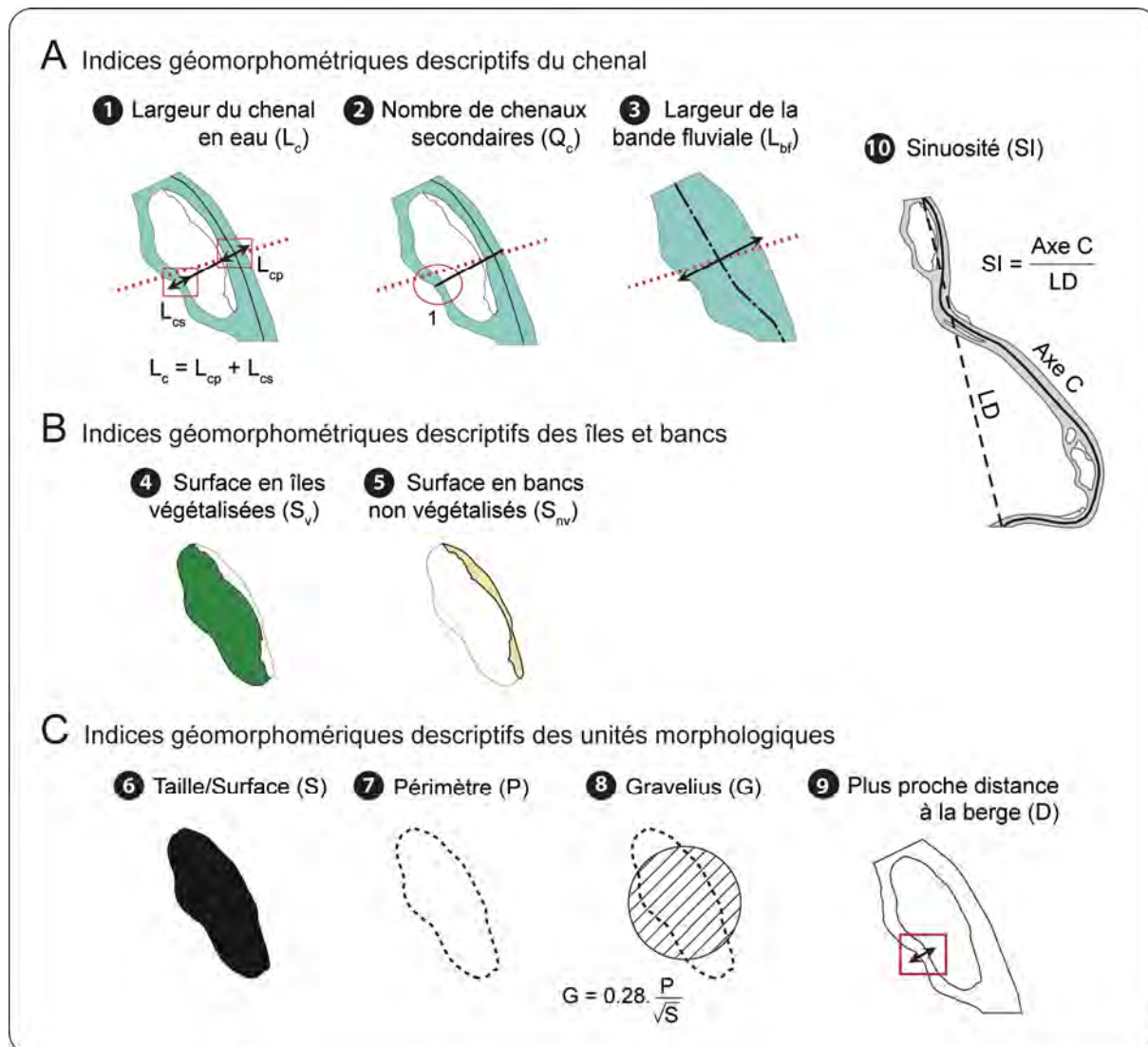


Figure 4.19 : Méthode de calcul des indices géomorphométriques.

4.4.2. La BD linéaire

Les calculs présentés précédemment ont été reproduits à l'échelle du linéaire (Table 4.2-*BD linéaire*). Dans la *BD linéaire* :

- les indices L_c et L_{bf} correspondent à la moyenne de l'ensemble des mesures réalisées ;
- l'indice Q_c correspond au pourcentage de tronçons caractérisés par une valeur positive ;
- les indices qui caractérisent les îles et bancs (S_v et S_{nv}) correspondent à des valeurs globales pour l'ensemble du linéaire ;
- les indices qui concernent les unités morphologiques (S , P , D et G) sont des valeurs brutes, qui pourront être synthétisées par le biais de diagrammes en boîte.

- l'indice de sinuosité (SI - Fig. 4.19-10) a été ajouté en calculant le ratio entre la longueur de l'axe central d'écoulement du chenal et la longueur de la ligne droite reliant les deux extrémités du linéaire.

| | Indices descriptifs du chenal | | | | Indices descriptifs des îles et bancs | | Indices descriptifs des unités morphologiques | | | |
|--------------------|-------------------------------|-----------------|----------------|----|---------------------------------------|-----------------|---|------------|------------|------------|
| | L _c | L _{bf} | Q _c | SI | S _v | S _{nv} | S | P | D | G |
| BD tronçons | MP | MP | MP | - | MS | MS | moy. MC | moy. MC | moy. MC | moy. MC |
| BD linéaire | moy. MP | moy. MP | % | MP | MS | MS | MC | MC | MC | MC |

Table 4.2 : Table de synthèse des mesures effectuées à l'échelle des tronçons (*BD tronçons*) et à l'échelle du linéaire (*BD linéaire*). Les indices présentés sont détaillés dans la figure 4.19. MP : mesures ponctuelles ; MS : mesures surfaciques ; MC : mesures ciblées sur les unités morphologiques. moy. : moyenne ; % : proportion des unités marquées par une valeur positive.

4.5. Traitements statistiques

Les données calculées à l'échelle du linéaire (*BD-linéaire*) ont fait l'objet d'un traitement statistique univarié classique, visant à quantifier l'évolution globale du linéaire au cours de la période 1868-2000.

Les données calculées à l'échelle des tronçons de mesure (*BD-tronçons*) ont fait l'objet d'une analyse factorielle multiple mixte (AFMmix), visant à produire une *typologie dynamique des formes fluviales* et ainsi à identifier des tendances évolutives distinctes au sein du linéaire. Ce traitement a été permis par la collaboration d'Amaury Labenne (doctorant en statistiques à l'Irstea de Bordeaux), dans le cadre des programmes de recherche Adapt'eau et Gagilau. Nous avons au préalable réalisé des analyses en composantes principales (ACP) à chaque date, dont les résultats s'avèrent moins pertinents pour notre étude (comparaison inter-dates impossible) et ne sont donc pas présentés dans ce mémoire.

L'AFM, développée par Escofier et Pagès (1994, 1998) et principalement utilisée en écologie (e.g., Bensizerara et al., 2013 ; Puech et al., 2014), est une méthode d'analyse factorielle qui permet le traitement de plusieurs groupes de variables, collectées sur les mêmes observations. De ce fait, elle permet une approche à la fois multivariée et diachronique. Le principe est relativement simple : chaque groupe de variables est d'abord traité individuellement par ACP et normalisé en utilisant la première valeur propre issue de cette analyse préliminaire ; une ACP globale est ensuite réalisée sur l'ensemble des valeurs pondérées de la base de données. Cette normalisation évite qu'un groupe de variables ne domine les résultats de l'ACP globale du fait de l'inertie de ses composantes principales. Dans cette étude, les données ont été organisées en quatre groupes, correspondant aux différentes dates renseignées par les cartes historiques étudiées.

Historiquement, l'AFM a d'abord été développée pour le traitement de données quantitatives, puis a été étendue au traitement simultané de groupes de variables pouvant être quantitatives ou qualitatives. L'AFMmix, développée par Chavent et al. (2012), permet le traitement de groupes contenant à la fois des variables quantitatives et qualitatives. Dans cette étude, chaque groupe contient essentiellement des données quantitatives. Seul un indice a été codé en variable qualitative en raison de l'homogénéité des valeurs collectées. Il s'agit du nombre de chenaux secondaires (Q_c), qui a été converti en absence/présence. Toutefois, un biais a été observé sur le groupe de données issu de la carte des années 1940, pour lequel cette variable est très dépendante de la position du transect de mesure

(fragmentation des îles et bancs). Elle n'a donc pas été prise en compte dans le traitement à cette date.

Afin d'identifier des groupes d'individus aux caractéristiques communes, une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été réalisée à partir des scores globaux des individus sur les 10 premiers axes factoriels de l'AFMmix, qui représentent 80% de l'inertie. Le nombre de classes retenues dépend du dendrogramme. Chacune correspond à des caractéristiques morphologiques du chenal spécifiques, propres à une ou plusieurs dates de mesure. Leur interprétation repose sur le calcul automatique de la valeur test (T) associée à chaque variable au sein de chaque classe (Eq. 4.1). On considère qu'une variable est caractéristique au sein d'une classe si sa valeur test est supérieure à 2.

Eq. 4.1

$$T = \frac{\mu_g - \mu}{\sqrt{\frac{\eta - \eta_g}{\eta - 1} \times \frac{\sigma^2}{\eta_g}}}$$

Avec :

η le nombre total d'individus

η_g le nombre d'individus dans la classe g

μ la moyenne de la variable calculée sur tous les individus

μ_g la moyenne de la variable calculée sur les individus de la classe g

σ l'écart type de la variable calculé sur tous les individus

4.6. Spatialisation de la typologie dynamique des formes fluviales et analyse qualitative des ajustements fluviaux

Chaque tronçon de mesure positionné le long du linéaire (Fig. 18) a été coloré en fonction de la classe à laquelle il appartient (typologie dynamique des formes fluviales révélée par AFM/CAH). La carte obtenue révèle une organisation spatiale des formes fluviales qui permet d'individualiser des zones homogènes au sein du linéaire. Chacune de ces zones a été étudiée individuellement.

L'analyse a porté sur le contenu des classes représentées, mais aussi sur les formes d'ajustement du chenal, susceptibles de traduire un fonctionnement hydro-sédimentaire particulier. La figure 4.20, proposée d'après les travaux de Fryirs et al. (2009), présente les différentes formes d'ajustement potentiellement visibles le long du linéaire. Certaines sont propres à la dynamique de méandrage (expansion, extension, rotation, translation et recoupement des boucles de méandre - Fig. 4.20-A). D'autres, plus générales, concernent la largeur du chenal et de la bande fluviale (Fig. 4.20-B et C). Les dernières concernent les dynamiques d'alluvionnement et de végétalisation, susceptibles de traduire le niveau de stabilité du chenal (Fig. 4.20-D).

La caractérisation des différentes zones à partir d'une analyse qualitative des couches digitalisées, ainsi menée sur les cartes couvrant la période 1868-2000, a été répétée sur les documents plus anciens et moins précis qui couvrent la période 1750-2000. Cette démarche nous a permis d'évaluer l'inscription sur le temps long des tendances observées.

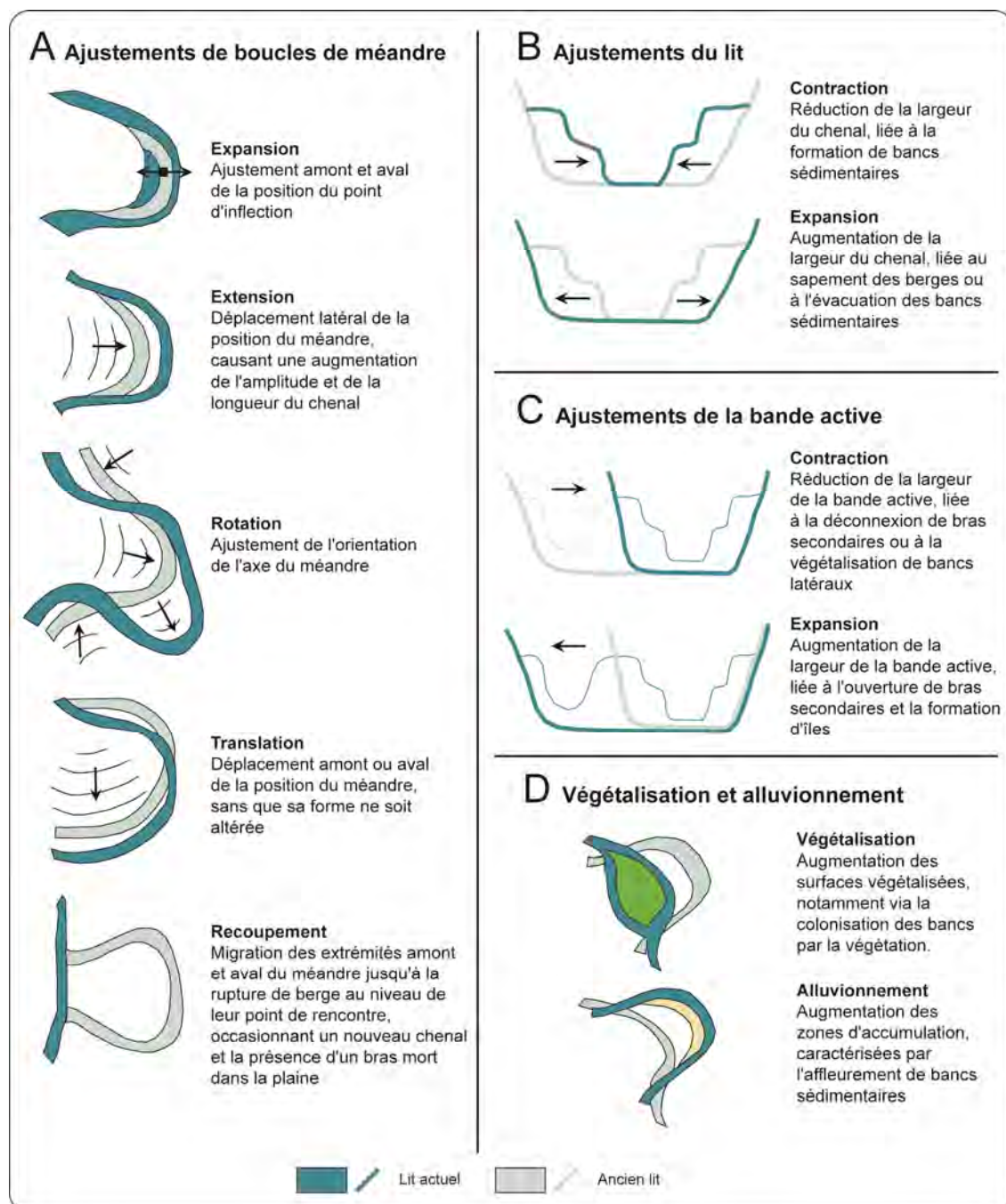


Figure 4.20 : Formes d'ajustement. A - Ajustements de boucles de méandre (modifié d'après Fryirs et al., 2009). B - Ajustements du lit (modifié d'après Fryirs et al., 2009). C - Ajustements de la bande active. D - Végétalisation et alluvionnement.

4.7. Limites de l'approche géohistorique

Toute étude impliquant un travail basé sur des sources historiques est inévitablement associée à une incertitude liée à des questions de précision spatiale, attributaire et temporelle des données (Gurnell et al., 2003 ; Payraudeau et al., 2010). Les principales limites de ce type de démarche ont été abordées par Gurnell et al. (2003) et sont synthétisées dans la table 4.3.

Dans cette étude, les documents les plus anciens sont concernés par la quasi totalité des contraintes listées dans la table 4.3. Les supports sont en effet souvent usés/abîmés ; les échelles sont hétérogènes ; les fichiers dont nous disposons sont des photographies plutôt que des scans ; le géoréférencement a dans la plupart des cas été difficile et est associé à des valeurs de RMSE fortes ; et les informations concernant le contexte de production sont anecdotiques. C'est pourquoi l'analyse de ces documents est restée qualitative et secondaire.

Dans le cas des cartes d'Etat-Major, la connaissance du contexte de production et la qualité des supports sont meilleures mais les échelles sont insuffisantes pour qu'une plus grande attention leur soit accordée.

Dans le cas des documents les plus récents, utilisés pour l'analyse quantitative, la plupart des contraintes ont pu être évitées : les outils et méthodes de levée sont relativement perfectionnés ; les systèmes de projection sont homogènes ; les supports sont de bonne qualité et ont pu être scannés ; les échelles ne dépassent pas 1:25000 ; le géoréférencement a été jugé de qualité ; les dates hétérogènes au sein d'une même série ont été jugées représentatives d'une décennie ; et le contexte de production des documents, notamment les dates et emprises des révisions, sont relativement bien connues. La carte de 1868 fait exception car le contexte de sa production est inconnu, bien que sa qualité soit évidente au vu du niveau de détail et de la qualité du géoréférencement.

Contraintes de précision spatiale

- Limites techniques du matériel de levée
- Evolution des méthodes de mesure de terrain
- Erreurs conceptuelles sur le terrain
- Biais liés aux différences d'échelle de représentation au sein d'un même corpus
- Biais liés aux différences de système de projection au sein d'un même corpus
- Erreurs liées à la distorsion de l'image et à l'angle de prise de vue (photos)
- Perte de précision liée à la pixellisation d'informations linéaires lors de la numérisation
- Déformation liée au géoréférencement

Contraintes de précision attributaire

- Biais liés à la démarche d'interpolation des attributs (e.g. altitude)
- Erreurs d'interprétation des attributs représentés

Contraintes de précision temporelle

- Dates de levée hétérogènes au sein d'un même corpus, voire d'une même série
- Révisions seulement partielles de certaines planches
- Usure et distorsion du papier avec le temps

Table 4.3 : Synthèse des limites de l'utilisation des cartes anciennes en géomorphologie abordées par Gurnell et al. (2003).

Deux contraintes relativement importantes restent toutefois présentes concernant ces documents. La première est une contrainte temporelle, liée à la faible fréquence de relevés, notamment entre 1868 et les années 1940. Cette absence de données représente une limite pour la périodisation de l'évolution de la dynamique fluviale garonnaise. Elle est susceptible de biaiser l'interprétation des ajustements fluviaux. Nous tenterons de dépasser cette contrainte par les approches de terrain, qui fournissent des enregistrements plus continus (cf. Partie 3). La seconde et principale source d'incertitude est d'ordre attributaire/conceptuelle. Elle réside dans la définition floue du *chenal en eau* sur les documents historiques, qui se répercute sur la représentation des îles et des bancs. En effet, selon le débit considéré, la largeur du lit et les surfaces en îles et en bancs affleurants pourront varier. Or, les informations concernant ce débit ne sont renseignées sur aucune des cartes et les dates exactes auxquelles les cartes ont été levées sont inconnues, ce qui empêche l'estimation du débit sur observation des chroniques hydrologiques. Toutefois, nous avons comparé les surfaces d'affleurement de bancs visibles sur les cartes IGN

(1940s, 1970s et 2000s) avec des photographies aériennes des mêmes périodes, pour lesquelles les dates de mission sont précisément renseignées (Géoportail) et peuvent ainsi être mises en relation avec les débits enregistrés à la station de Toulouse-Portet (HYDRO). Les affleurements visibles sur les cartes s'avèrent systématiquement plus grands que ceux apparents sur les photographies prises en période de crue et systématiquement plus réduits que ceux apparents sur les photographies prises en période d'étiage. Nous pouvons ainsi supposer que les cartographes ont cherché à minimiser les effets de l'oscillation des hauteurs d'eau entre les dates de missions aériennes en délimitant le chenal en eau pour un débit moyen, probablement en s'appuyant sur les données de terrain. La méthode utilisée pour définir les limites du chenal sur la carte de 1868 reste plus incertaine. Par ailleurs, si les figurés indiquant la présence de végétation sont généralement bien lisibles (distinction entre végétation haute et végétation basse sur certains documents), les figurés indiquant la présence de bancs désignent un objet plus flou (banc de sable ou banc de galet) et sont eux aussi associés à une marge d'incertitude notable.

4.8. Conclusion du chapitre 4

Au commencement de cette étude, un corpus de 12 cartes historiques couvrant le linéaire de la Garonne entre Toulouse et la confluence du Tarn depuis le début du XVIII^e siècle a été mis à notre disposition. Au total, neuf cartes issues de ce corpus, qui couvrent la période 1750-2000, ont été utilisées (1750-1770 ; 1810 ; 1833 ; 1850 ; 1868 ; 1900 ; 1940s ; 1970s et 2000s). Chacun de ces documents a d'abord été géoréférencé (à l'exception de la carte des années 2000 - Scan25® - déjà géoréférencée par l'IGN), puis a fait l'objet d'une digitalisation des formes fluviales sous SIG.

Au sein de ce corpus, quatre documents couvrant la période 1868-2000 ont retenu notre attention en raison de leurs niveaux de précision et de détail :

- une carte anonyme réalisée en 1868 au 1:10000, particulièrement précise et détaillée pour l'époque ;
- un ensemble de planches produites par l'IGN dans les années 1940 à des échelles comprises entre 1:5000 et 1:20000 ;
- un ensemble de planches produites par l'IGN dans les années 1970 au 1:25000 ;
- un ensemble de planches au 1:25000 dressées et géoréférencées par l'IGN (scan25®) dans les années 2000 (révisions entre 2002 et 2006).

A partir de ces quatre documents/groupes de document, une analyse géomorphométrique des formes fluviales a pu être menée. Pour cela, la plaine de la Garonne toulousaine a été segmentée en tronçons de mesure de 1 km de longueur sous SIG. A partir de cette grille de mesure, neuf indices morphométriques ont été calculés à chaque date et à intervalle régulier le long du linéaire. Une première base de données diachronique (*BD-tronçons*) a ainsi été établie. Les calculs ont ensuite été répétés à l'échelle du linéaire afin de générer une seconde base de données diachronique plus globale (*BD-linéaire*).

A partir de ces données, trois démarches d'analyse ont été mises en œuvre :

- 1) La base de données réalisée à l'échelle du linéaire (*BD-linéaire*) a été traitée par analyse quantitative univariée classique, afin d'observer la tendance évolutive globale au cours de la période 1868-2000.
- 2) La base de données réalisée à l'échelle des tronçons de mesure (*BD-tronçons*) a été traitée par analyse factorielle multiple mixte (AFMmix) et classification ascendante hiérarchique (CAH). Cette approche à la fois multivariée et diachronique a permis d'établir une typologie dynamique des formes fluviales pour la période 1868-2000, qui a mis en évidence une segmentation du linéaire en plusieurs zones homogènes.

- 3) Une analyse qualitative des formes et ajustements fluviaux a enfin été menée au sein de chacune des zones délimitées, d'abord sur la période 1868-2000, puis sur la période 1750-1868 à partir des documents les plus anciens et les moins précis.

Bien qu'un niveau de confiance relativement élevé ait été accordé aux cartes les plus récentes, certaines limites propres à tout travail basé sur des sources historiques restent présentes, notamment l'absence de données inter-dates et l'hétérogénéité des attributs représentés sur les cartes.

Chapitre 5. - Evolution des formes fluviales au cours de la période 1868-2000 : quantification, typologie dynamique et inscription sur le long terme

Ce chapitre présente les résultats des analyses menées sur les documents cartographiques historiques (Fig. 5.1). L'évolution globale des formes fluviales au cours de la période 1868-2000 est d'abord quantifiée (1). Les résultats de l'analyse diachronique multivariée (AFMmix/CAH), menée sur les données géomorphométriques générées à l'échelle des tronçons de mesure, sont ensuite présentés (2). La typologie dynamique des formes fluviales qui en ressort, une fois spatialisée, induit un découpage du linéaire en zones homogènes. Au sein de chacune de ces zones, l'évolution du comportement hydro-sédimentaire du chenal est enfin analysée de manière qualitative, d'abord pour la période 1868-2000, puis pour la période 1750-1868 (3).

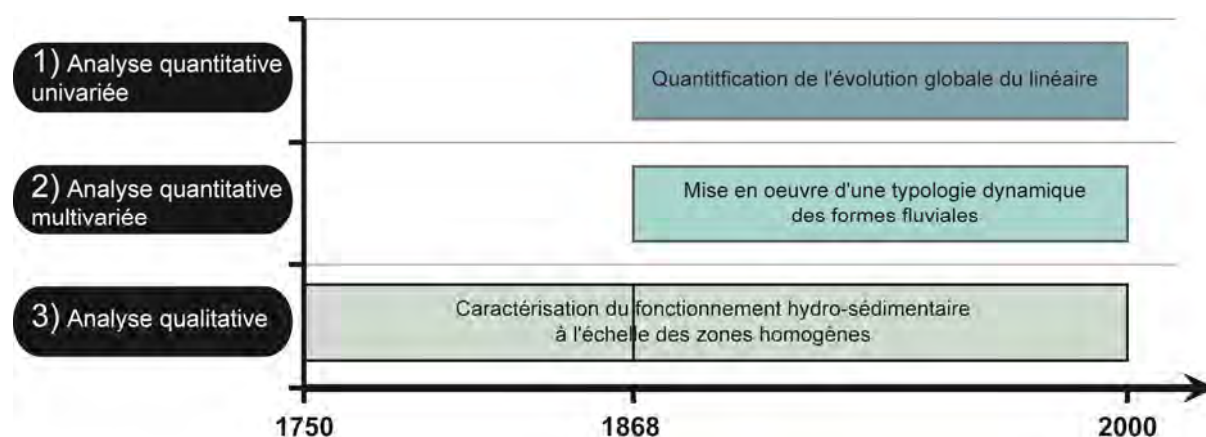


Figure 5.1: Les trois types de résultats issus de l'analyse des formes fluviales à partir des documents cartographiques historiques.

5.1. Evolution globale des formes fluviales au cours de la période 1868-2000 : approche quantitative univariée

A l'échelle du linéaire, l'évolution des indices liés au chenal (SI , Q_c et L_{bf} - Fig. 5.2-A à C) et l'évolution des indices liés aux îles et bancs (S_v et S_{nv} - Fig. 5.2-D) révèlent une simplification et une homogénéisation des formes fluviales tout au long de la période 1868-2000.

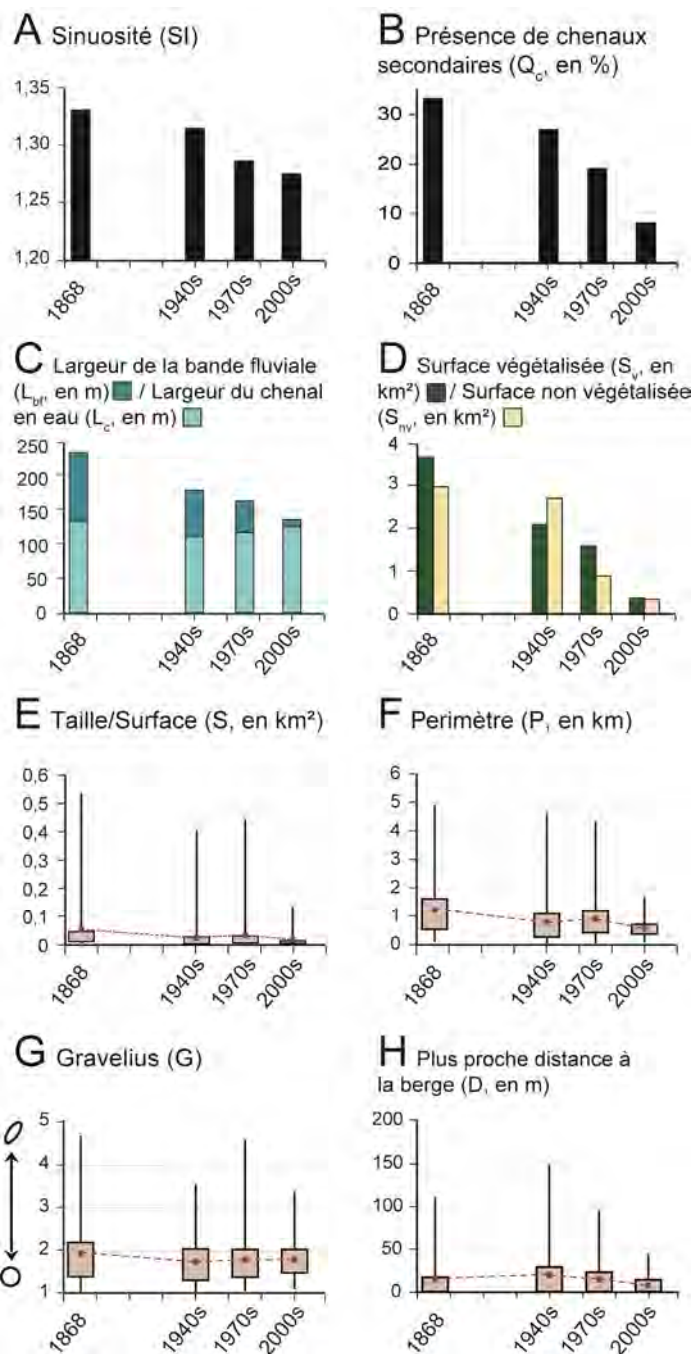
L'indice de sinuosité (SI - Fig. 5.2-A) a légèrement baissé (de 1,33 à 1,27, *i.e.*, -0,0004/an en moyenne - Table 5.1), avec un rythme plus soutenu entre les années 1940 et les années 1970 (-0,010/an en moyenne - Table 5.1). Malgré cette évolution, la Garonne toulousaine est restée dans l'intervalle $[1,25 < SI < 1,50]$ des cours d'eau à chenaux dits fortement sinueux.

Les surfaces en îles et en bancs (Fig. 5.2-D) ont connu une évolution plus significative. En 1868, les îles et les bancs couvraient des surfaces respectives de 3,68 km² et 2,96 km² (*i.e.*, 21 et 17% de la bande fluviale) alors que dans les années 2000, ces surfaces n'atteignaient plus que 0,37 et 0,34 km² respectivement (*i.e.*, 6% de la bande fluviale au total). La surface totale perdue au cours de la période d'étude de 130 ans correspond à 3,30 km² pour les îles (90% de la surface initiale) et 2,60 km² pour les bancs (88% de la surface initiale). La réduction de la surface occupée par les îles a débuté dès le début de la période

d'étude (perte de 43% des surfaces en île entre 1868 et les années 1940) et a été progressive jusqu'aux années 2000, avec un taux de réduction moyen de 0,025 km²/an (Table 5.1). La réduction de la surface occupée par les bancs n'a débuté qu'après les années 1940 et a été particulièrement forte entre les années 1940 et les années 1970, avec un taux moyen de 0,060 km²/an (Table 5.1) et la disparition de 61% de la surface en banc initiale.

La réduction des surfaces en île s'est accompagnée d'une réduction du nombre de chenaux secondaires (Q_c - Fig. 5.2-B) et d'une réduction de la largeur de la bande fluviale (L_{bf} - Fig. 5.2-C). En effet, en 1868 33% des transects de mesure recoupaient au moins un bras secondaire, contre seulement 8% dans les années 2000 et la bande fluviale présentait une largeur moyenne de 237 m contre seulement 137 m dans les années 2000 (*i.e.*, une perte moyenne de 76 cm/an - Table 5.1). La largeur du chenal en eau (L_c - Fig. 5.2-C) est restée relativement stable tout au long de la période d'étude, avec une légère réduction entre 1868 et les années 1940, puis une tendance à l'élargissement à la fin de la période, probablement corrélée à la réduction des surfaces en bancs.

Figure 5.2 : Evolution des variables mesurées/calculées à l'échelle du linéaire. Les diagrammes en boîtes représentent de bas en haut : la valeur minimale, le premier quartile, le troisième quartile et la valeur maximale. Les moyennes sont figurées par un point rouge.



Les tailles, formes et positions des unités morphologiques (S , P , G et D - Fig. 5.2-E-H) ont suivi une évolution plus complexe, qui révèle une homogénéisation des formes fluviales à la fin de la période. Deux tendances apparaissent : 1) un modèle dominant d'îles et/ou de bancs de taille et de forme relativement homogènes (étendues réduites entre Q1 et Q3), qui a peu évolué au cours de la période d'étude et 2) des individus marginaux, représentés par des valeurs maximales extrêmes qui se sont nettement réduits à la fin de la période, entre les années 1970 et les années 2000. Le modèle dominant correspond à des formes de taille réduite, tendant vers la circularité et situées proches de la berge. Ces formes présentent à chaque date des surfaces, périmètres, degrés de circularité et distances à la berge proches de la moyenne (S moy. = [0,01-0,05 km²] ; P moy. = [600 m - 1,25 km] ; G moy. = [1,72-1,89] et D moy. = [8-20 m]). Entre 1868 et les années 1970, les formes marginales atteignaient

des valeurs nettement supérieures, avec des surfaces de l'ordre de [0,41-0,53 km²] et des périmètres de l'ordre de [4,28-4,86 km]. Ces unités morphologiques pouvaient présenter des formes très allongées (G max. = [3,54-4,65]) et être particulièrement isolées de la berge (D max. = [94-148 m]). Dans les années 2000, les valeurs maximales de S, P, G et D n'atteignaient plus que 0,14 km² ; 1,68 km ; 3,36 et 43 m respectivement.

| | 1868-1940 | 1940-1970 | 1970-2000 | 1868-2000 |
|---|-----------|-----------|-----------|----------------|
| Taux d'évolution (valeurs brutes) | | | | |
| Sinuosité (SI, SI/an) | -0,0002 | -0,0010 | -0,0004 | -0,0004 |
| Surface végétalisée (S _v , km ² /an) | -0,022 | -0,017 | -0,041 | -0,025 |
| Surface non végétalisée (S _{nv} , km ² /an) | -0,004 | -0,061 | -0,018 | -0,020 |
| Taux d'évolution (valeurs moyennes) | | | | |
| Largeur de la bande fluviale (L _{bf} , m/an) | -0,79 | -0,53 | -0,90 | -0,76 |
| Largeur du chenal en eau (L _c , m/an) | -0,32 | +0,23 | +0,27 | -0,06 |
| Taille/Surface (S, m ² /an) | -347 | +263 | -635 | -274 |
| Périmètre (P, m/an) | -6 | +5 | -11 | -5 |
| Gravelius (G, G/an) | -0,002 | +0,002 | 0 | -0,001 |
| Plus proche distance à la berge (D, m/an) | +0,10 | -0,18 | -0,23 | -0,04 |

Table 5.1: Taux d'évolution des variables mesurées/calculées à l'échelle du linéaire

5.2. Typologie dynamique des formes fluviales au cours de la période 1868-2000 : approche quantitative multivariée

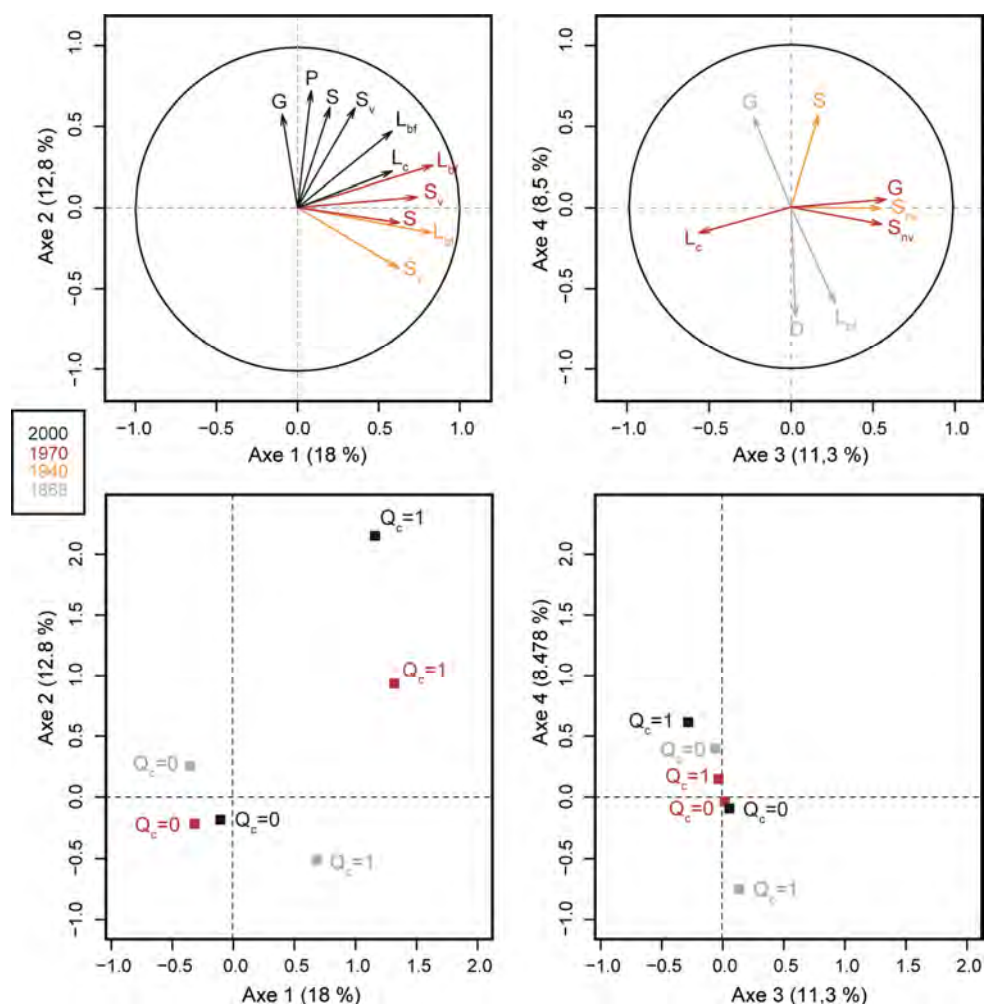
5.2.1. Analyse factorielle multiple mixte (AFMmix)

L'analyse factorielle multiple mixte (AFMmix) permet de mettre en évidence des liens de corrélation entre les variables mesurées aux quatre dates d'étude. Elle peut ainsi révéler les particularités du chenal à une date donnée et/ou reconnaître des formes semblables d'une date à l'autre. Afin d'aborder les grandes tendances mises en évidence par cette analyse, nous avons choisis de concentrer l'interprétation qui suit sur les quatre premiers axes factoriels de l'AFMmix, qui représentent 50% de la variance totale. La figure 5.3 illustre ces résultats en présentant les cercles des corrélations pour les variables quantitatives et les cartes des modalités pour les variables qualitatives. Pour faciliter l'interprétation, seules les variables avec une bonne qualité de projection sur les axes ($\cos^2 > 0,3$) sont représentées sur les cercles des corrélations.

Les résultats de l'AFMmix mettent principalement en évidence une opposition entre des tronçons ou des dates pour lesquels le chenal est caractérisé par la présence d'îles et des tronçons ou des dates pour lesquels les caractéristiques dominantes du chenal sont liées aux bancs :

- L'axe 1 représente 18 % de la variance totale. Il est principalement caractérisé par les variables liées aux îles végétalisées des années 1940 et des années 1970 (L_{bf}, S_v et Q_c=1). Il est aussi corrélé positivement à la taille des unités morphologiques dans les années 1970 (S), ainsi qu'aux largeurs du chenal en eau et de la bande fluviale dans les années 2000 (L_c et L_{bf}). Aucune corrélation négative n'est observée sur cet axe.

- L'axe 2 représente 12,8 % de la variance totale et souligne une particularité des années 2000. Il est en effet corrélé positivement à la quasi-totalité des variables mesurées à cette date. Il est particulièrement lié aux variables de taille et de forme (P, S et G) mais aussi à la surface végétalisée (S_v) et à la présence de bras secondaires ($Q_c=1$).
- L'axe 3 représente 11,3 % de la variance totale. Il est corrélé positivement à la variable surface en banc non végétalisée (S_{nv}) des années 1940 et des années 1970, ainsi qu'à l'indice de Gravelius (G) dans les années 1970. Il est par ailleurs corrélé négativement à la largeur du chenal en eau (L_c) des années 1970. Cet axe est donc principalement associé aux bancs des années 1970 et notamment aux bancs latéraux, dont les formes sont particulièrement allongées et dont l'emprise réduit la largeur du chenal en eau.
- L'axe 4 représente 8,5 % de la variance et est principalement lié aux unités morphologiques de l'année 1868. Il présente en effet un lien de corrélation positif avec l'indice de Gravelius (G) et un lien de corrélation négatif avec la largeur de la bande fluviale (L_{bf}) et la distance à la berge (D), mesurés à cette date. Il est par ailleurs corrélé positivement avec la taille des unités morphologiques dans les années 1940 (S).



5.2.2. Classification ascendante hiérarchique (CAH)

Le traitement des résultats de l'AFMmix par classification ascendante hiérarchique (CAH) facilite leur interprétation en regroupant par classe les tronçons qui présentent des scores similaires sur les composantes principales. Bien que seules les quatre premières composantes aient été interprétées précédemment, la CAH a été réalisée sur les 10 premières composantes de l'AFMmix, qui représentent 80% de la variance totale. Conformément au dendrogramme (Fig. 5.4), une classification en sept classes a été retenue.

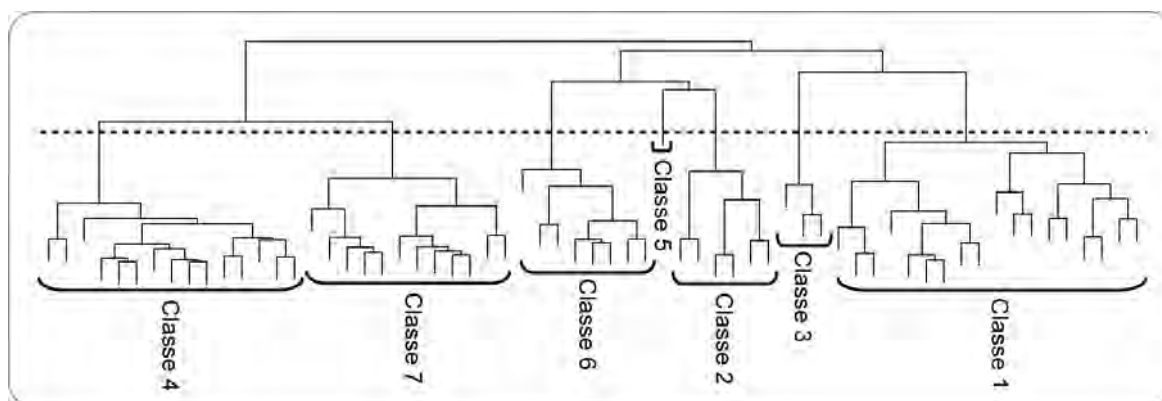


Figure 5.4: Dendrogramme montrant l'organisation des classes de la CAH

Les caractéristiques des sept classes peuvent être déduites des valeurs tests (T) associées à chaque variable (Fig. 5.5) :

- La classe 1 (18 tronçons) rassemble des tronçons principalement caractérisés par un chenal en eau large (L_c) sur la quasi-totalité de la période d'étude, des années 1940 aux années 2000. Au début de la période d'étude, *i.e.*, en 1868, ces tronçons présentent des îles (peu ou pas de bancs - S_{nv}) éloignées de la berge (D), de taille réduite (S et P) et de forme relativement circulaire (G). Dans les années 1940, les unités morphologiques présentes dans ces tronçons ont gardées les mêmes caractéristiques (D , P et G) mais aucune distinction entre île et banc n'est mise en évidence par les valeurs tests. A la fin de la période, entre les années 1970 et les années 2000, les tronçons de la classe 1 ne se caractérisent plus que par une bande fluviale large (L_{bf}).
- La classe 2 (6 tronçons) rassemble des tronçons qui recoupent une bande fluviale large (L_{bf}) dans les années 1940, formée par de grandes îles végétalisées (S_v , S et P). Les unités morphologiques présentes dans ces tronçons sont marquées par un périmètre étendu en 1868 (P) et au contraire réduit et tendant vers la circularité (P et G) à la fin de la période.
- La classe 3 (3 tronçons) révèle une particularité des années 2000. Elle rassemble des tronçons à bande fluviale large (L_{bf}) à cette date, formée par de grandes îles végétalisées (S_v , $Q_c=1$, S et P). Ces tronçons présentent aussi une bande fluviale large dans les années 1970 (L_{bf}), caractérisée par la présence de chenaux secondaires ($Q_c=1$).
- La classe 4 (15 tronçons) présente des caractéristiques complexes. Elle est marquée par des valeurs faibles pour de nombreuses variables sur toute la période d'étude, notamment pour 1868 et les années 1940. Cette classe semble concerner les secteurs du linéaire marqués par une certaine simplicité morphologique tout au long de la période d'étude.

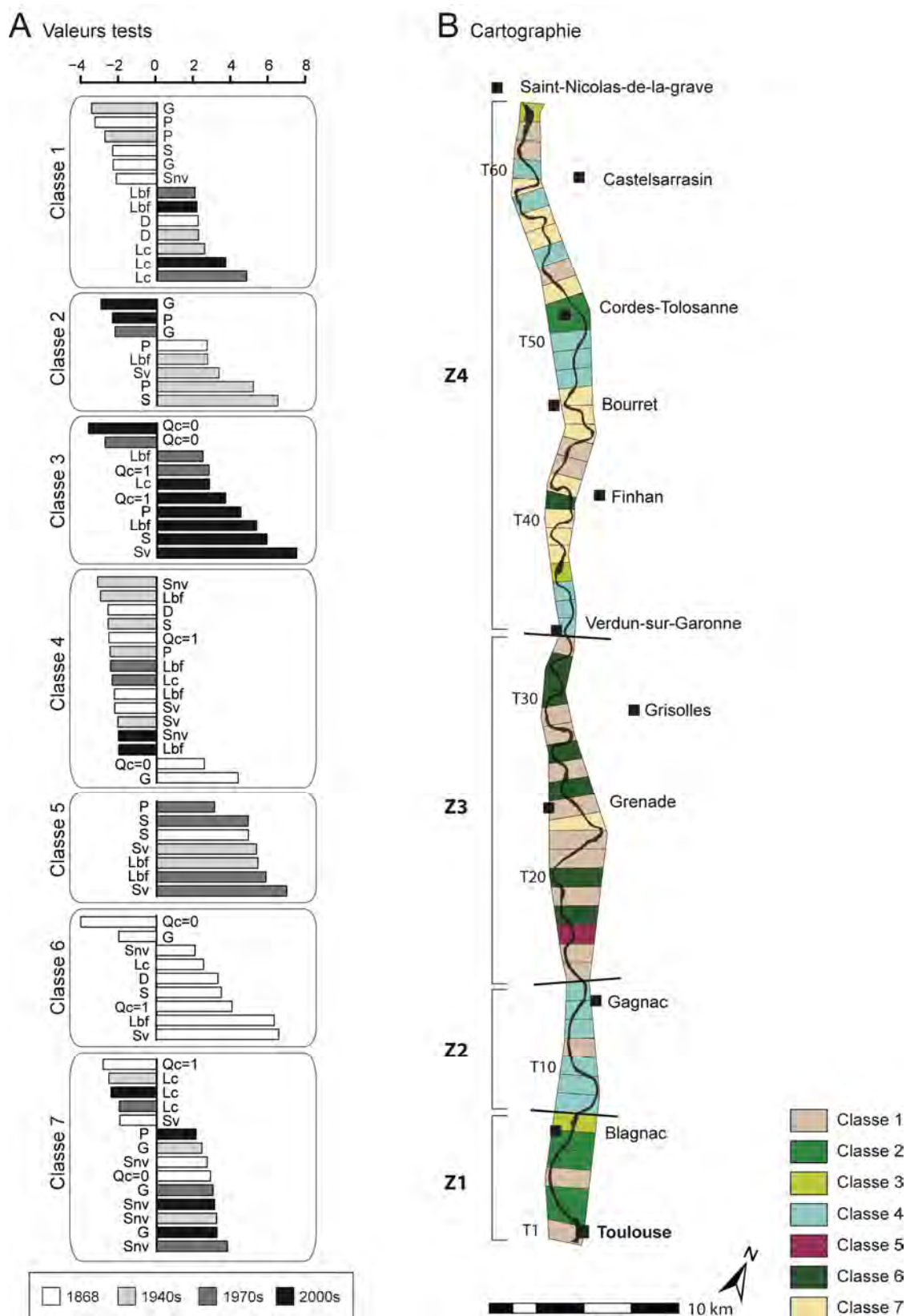


Figure 5.5 : Typologie dynamique des formes fluviales. A - Valeurs tests associées à chaque variable pour chacune des classes de la typologie issue de l'AFM/CAH. B - Représentation cartographique de la typologie issue de l'AFM/CAH.

- La classe 5 ne concerne qu'un tronçon, marqué par une bande fluviale large (Lbf) dans les années 1940 et les années 1970, formée par une ou plusieurs île(s) végétalisée(s) (Sv). Ce tronçon se caractérise aussi par la taille de ses unités morphologiques en 1868 (S) et dans les années 1970 (S et P).
- La classe 6 (8 tronçons) révèle une particularité de l'année 1868. Elle concerne des tronçons marqués par de grandes îles végétalisées formant une bande fluviale large à cette date (S_v , L_{bf} , $Q_c=1$, S et D). Les tronçons de cette classe sont aussi caractérisés, dans une moindre mesure, par un chenal en eau large (L_c), la présence de bancs (S_{nv}) et une tendance à la circularité des formes (G) à cette date.
- La classe 7 (12 tronçons) concerne des tronçons marqués par la présence de bancs tout au long de la période d'étude (S_{nv}). Sur la quasi-totalité de la période, entre les années 1940 et les années 2000, les unités morphologiques présentent des formes allongées (G) et le chenal en eau apparaît réduit (L_c), ce qui révèle probablement la présence de bancs latéraux dans le chenal. Au début de la période, *i.e.* en 1868, les tronçons de la classe 7 ne sont marqués que par la faible présence des îles (S_v et Q_c).

5.2.3. Analyse spatiale des résultats le long du linéaire

La typologie dynamique des formes fluviales obtenue par AFM/CAH, révèle une organisation spatiale des tronçons de même classe en certains points du linéaire (Fig. 5.5). Cette distribution spatiale induit une segmentation du linéaire en quatre zones homogènes, chacune caractérisée par la présence/dominance d'une ou plusieurs classes.

La zone Z1, qui concerne les communes de Toulouse et Blagnac (7 km), est dominée par la classe 2 (4 tronçons) et est aussi marquée par la présence de la classe 1 (2 tronçons). Cette association de classes révèle la présence de grandes îles végétalisées dans les années 1940 (classe 2), ainsi qu'un chenal en eau large sur la quasi-totalité de la période, des années 1940 aux années 2000 (classe 1). Le tronçon 7 se distingue de ces tendances par son appartenance à la classe 3, qui souligne la présence d'une ou plusieurs grande(s) île(s) dans les années 2000.

La zone Z2, entre Blagnac et Gagnac (7 km), s'individualise par la dominance de la classe 4 (6 tronçons), qui traduit une certaine simplicité morphologique du chenal tout au long de la période d'étude. Seul le tronçon 11 fait exception, étant attribué à la classe 1. En ce point, le chenal est large sur la quasi-totalité de la période, des années 1940 aux années 2000.

La zone Z3, entre Gagnac et Verdun-sur-Garonne (19 km) s'individualise par la présence/l'association de deux classes peu présentes sur le reste du linéaire : les classes 1 (10 tronçons) et 6 (7 tronçons). Cette association traduit la présence de grandes îles végétalisées en 1868, formant une bande fluviale large (classe 6), ainsi qu'un chenal en eau large tout au long de la période d'étude (classe 1). Les tronçons T17 et T23 s'individualisent par leur appartenance respective à la classe 5 et à la classe 7. La première classe révèle la présence d'une grande île végétalisée dans les années 1940 et les années 1970, alors que la seconde traduit la présence de bancs latéraux sur la quasi-totalité de la période, entre les années 1940 et les années 2000.

Enfin, la zone Z4, entre Verdun-sur-Garonne et Saint-Nicolas-de-la-Grave (30 km), se caractérise par une plus grande hétérogénéité que les autres zones, avec la quasi-totalité des classes représentées. Cette zone se distingue par la forte présence des classes 7 (11 tronçons) et 4 (9 tronçons), qui sont respectivement associées à la présence de bancs et à la simplicité morphologique du chenal tout au long de la période d'étude. Les autres classes présentes dans la zone Z4 révèlent plusieurs nuances au sein de cette tendance globale.

Elles ciblent particulièrement les tronçons au sein desquels des îles se sont formées et ont disparu à différentes dates de la période d'étude.

5.3. Evolution du fonctionnement hydro-sédimentaire au cours de la période 1750-2000 : approche qualitative

La typologie dynamique des formes fluviales a permis de découper le linéaire en quatre zones homogènes et de proposer une première interprétation des trajectoires d'évolution propres à chacune de ces zones. L'analyse qualitative des couches digitalisées, d'abord sur la période 1868-2000, puis sur la période 1750-1868, vise maintenant : 1) à approfondir ces observations en caractérisant les formes et ajustements fluviaux ; 2) à évaluer/valider la pertinence de la typologie et du découpage en zones proposés et 3) à voir si les tendances observées sur la période 1868-2000 s'inscrivent à plus long terme.

5.3.1. Comportement du chenal au cours de la période 1868-2000

5.3.1.1. La zone Z1

Dans la zone amont Z1, la bande fluviale se caractérisait par la présence de trois longues îles et quelques bancs latéraux au début de la période d'étude (1868), qui ont par la suite progressivement disparu du linéaire (Fig. 5.7). L'île de Tounis s'est en effet rattachée à la berge entre 1868 et les années 1940, alors que l'île de Pecette s'est étendue vers l'aval. La majeure partie des îles restantes a ensuite disparu entre les années 1940 et les années 1970, là aussi par rattachement à la berge. Après les années 1970, la morphologie du chenal est restée particulièrement simple. Seule la partie la plus récente de l'île de Pecette était encore présente dans les années 2000, ce qui est mis en évidence par l'appartenance du tronçon 7 à la classe 3. La zone Z1 est en outre marquée par la stabilité du chenal tout au long de la période d'étude. Aucune forme d'ajustement de boucle de méandre n'est en effet observée entre 1868 et les années 2000.

5.3.1.2. La zone Z2

En 1868, la zone Z2 était marquée par des surfaces végétalisées très réduites et par la présence de bancs, notamment de bancs latéraux de forme particulièrement allongée (Fig. 5.7). Seul le tronçon 11 faisait exception en présentant un banc plus circulaire, souligné par son appartenance à la classe 1. La quasi-totalité des bancs de cette zone a disparu entre 1868 et les années 1940, alors que les surfaces végétalisées se sont légèrement développées. Au vu de la position des îles nouvellement formées et de l'absence d'élargissement du chenal en eau, cette transition semble principalement dépendre d'une colonisation/stabilisation des bancs par la végétation (e.g., dans les tronçons T8-T9 et T11). Les îles nouvellement formées ont ensuite disparu du linéaire à la fin de la période, i.e. entre les années 1970 et les années 2000, et le chenal s'est ainsi nettement simplifié. Il faut par ailleurs noter que le chenal a opéré une légère rotation/extension au niveau du méandre des Quinze sols au début de la période, entre 1868 et les années 1940. Il s'est ensuite stabilisé après les années 1940.

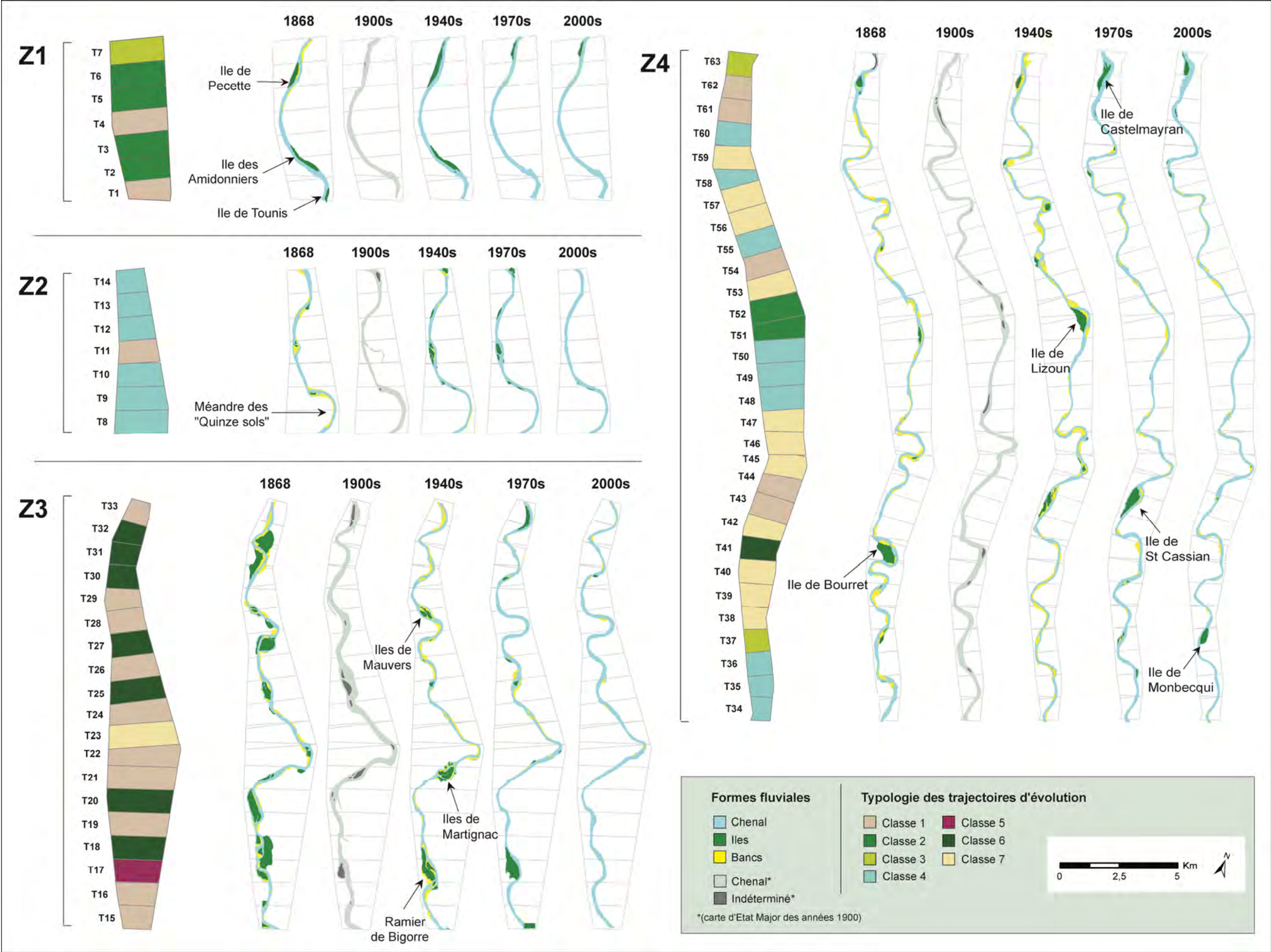


Figure 5.6 : Trajectoire d'évolution des zones Z1 à Z4 entre 1868 et les années 2000. La carte de 1900-1909 est grisée car son échelle ne permet pas de lui accorder la même confiance qu'autres cartes.

5.3.1.3. La zone Z3

Dans la zone Z3, les formes fluviales étaient nombreuses et hétérogènes au début de la période d'étude, *i.e.* en 1868 (Fig. 5.7) : grandes îles séparées de la plaine par des chenaux étroits ; îles plus réduites et plus éloignées de la berge ; nombreux bancs, latéraux, centraux, ou accolés aux îles. La quasi-totalité des îles visibles en 1868 a ensuite disparu avant les années 1940, en partie sous l'effet de la mobilité du chenal (*e.g.*, dans les tronçons T20 et T25) et en partie par rattachement à la berge (*e.g.*, dans les tronçons T27 et T31-T32). Trois grands complexes d'îlots se sont toutefois formés au cours de cette même période et les bancs sont restés nombreux. Après les années 1940, le linéaire a continué à se simplifier avec la disparition des îles de Martignac et de Mauvers, qui semblent avoir été érodées, et la réduction des surfaces en banc sous l'effet de leur colonisation par la végétation (*e.g.*, dans les tronçons T16 ; T30 et T32-T33). Seule une île relativement large était encore présente dans les années 1970 : le Ramier de Bigorre. La marginalité de cette forme a été soulignée par son appartenance à la classe 5. Dans les années 2000, le chenal ne comptait plus que deux petites îles et quelques bancs.

En même temps qu'il s'est simplifié, le linéaire fluvial s'est progressivement stabilisé. Aucune différence de tracé n'est en effet observée entre les couches digitalisées des années 1970 et celles des années 2000, alors que plusieurs ajustements ont pu être observés au début de la période d'étude (*e.g.*, changement total de trajectoire dans les tronçons T17-T19 entre 1868 et les années 1940 ; translation de la grande sinuosité visible dans les tronçons T22-T23 entre 1868 et les années 1970 ; extension de la boucle de méandre visible dans les tronçons T27-T28 entre 1868 et les années 1940 ; etc.).

5.3.1.4. La zone Z4

La zone aval Z4 se caractérise principalement par la présence de nombreuses barres de méandre, notamment en 1868 et dans les années 1940 (Fig. 5.7). Ces surfaces en banc particulièrement étendues au début de la période d'étude se sont nettement réduites après les années 1940, jusqu'à devenir anecdotiques dans les années 2000. Cette évolution semble s'être opérée via l'expansion de la végétation sur les barres de méandre mais aussi via l'évacuation de la charge alluviale en certains points du linéaire, attestée par l'élargissement ponctuel du chenal en eau (*e.g.*, dans les tronçons T38-39 entre 1868 et les années 1940 ; dans le tronçon T50 entre les années 1970 et les années 2000 ; etc.).

Contrairement à la zone Z3, seules quelques îles peuvent être observées ponctuellement dans la zone Z4 au cours de la période 1868-2000, souvent individualisées par leur appartenance à des classes marginales (*e.g.*, île de Bourret - classe 6 ; île de Lizoun - classe 2 ; îles de Monbécqui et Castelmayran - classe 3). Ces îles semblent s'être formées et avoir disparues sous l'effet de la mobilité du chenal, qui s'avère particulièrement forte entre 1868 et les années 1970. Ce caractère se retrouve principalement au niveau des tronçons caractérisés par la classe 7 dans la partie amont de la zone (*e.g.*, recoupement dans le tronçon T40 entre 1868 et les années 1940 ; translation dans les tronçons T41-T42 entre 1868 et les années 1970 ; recoupement et extension dans le tronçon T45 entre 1868 et les années 1970 ; rotation puis recoupement dans les tronçons T46-T47 ; etc.). Dans les années 2000, le chenal présentait un tracé quasiment identique à celui des années 1970, ce qui atteste de sa stabilisation sur la fin de la période d'étude.

5.3.2. Comportement du chenal au cours de la période 1750-1868

L'analyse du comportement du chenal au cours de la période 1750-1868 vise à évaluer si les tendances observées entre 1868 et les années 2000 s'inscrivent dans une évolution à plus long terme.

5.3.2.1. La zone Z1

Les cartes antérieures à 1868 montrent que la stabilité du chenal dans la zone Z1 n'est pas propre à la période d'étude comprise entre 1868 et les années 2000 (Fig. 5.8). Cette stabilité caractérise la zone Z1 depuis au moins la seconde moitié du XVIII^e siècle. Les différentes îles, qui se sont progressivement rattachées à la berge entre 1868 et les années 2000 (Tounis, Amidonniers et Pecette), sont en effet visibles depuis au moins les années 1750-1770 et le tracé du lit a peu évolué depuis cette date. Seule l'île de Pecette a légèrement évolué, puisqu'elle semble avoir quasiment disparu entre 1810 et les années 1848-1850. L'observation de ce type d'évolution peut toutefois relever d'un artefact, lié à des divergences de représentation entre les auteurs des différentes cartes.

5.3.2.2. La zone Z2

La simplicité morphologique et l'évolution lente du chenal, attestées pour la période 1868-2000 dans la zone Z2, caractérisaient déjà cette zone au cours de la période 1750-1868 (Fig. 5.8), à l'exception du dernier tronçon (T14). Des bancs peuvent en effet être observés dans les convexités de méandre (cartes de 1810 et 1833), alors que le recoupement d'une boucle de méandre de faible amplitude entre 1833 et les années 1848-1850 au niveau du tronçon T11, représente le seul ajustement notable. Seule une île relativement étendue peut être observée, développée dans cette même boucle de méandre dans les années 1750-1770. Les surfaces végétalisées ont par ailleurs été très faibles tout au long de la période 1750-1868. Le dernier tronçon (T14) se caractérise par une dynamique très différente, avec la formation d'un complexe d'îles et des ajustements latéraux significatifs, qui rappellent les formes observées dans la zone Z3.

5.3.2.3. La zone Z3

Dans la zone Z3, la présence de grandes îles végétalisées se retrouve sur les cartes antérieures à 1868 (Fig. 5.8), à l'exception de la carte d'Etat-Major de 1848-1850, qui affiche un tracé relativement simple. Cette distinction de la carte d'Etat-Major peut dépendre d'une phase réelle de rattachement des îles à la berge, étant donné que le tracé du chenal principal est similaire à celui de 1833, ou de l'échelle de la carte (1:40000), qui n'a peut-être pas permis la représentation des chenaux secondaires les plus étroits. Les îles représentées sur les autres cartes se caractérisent par une certaine instabilité. Leur présence et leur forme ont en effet évolué d'une date à l'autre, au gré des ajustements du chenal principal. La carte de 1833, sur laquelle les zones d'érosion ont été renseignées, souligne cette dynamique latérale forte en révélant trois zones d'érosion alors qu'aucune n'a été signalée plus en amont.

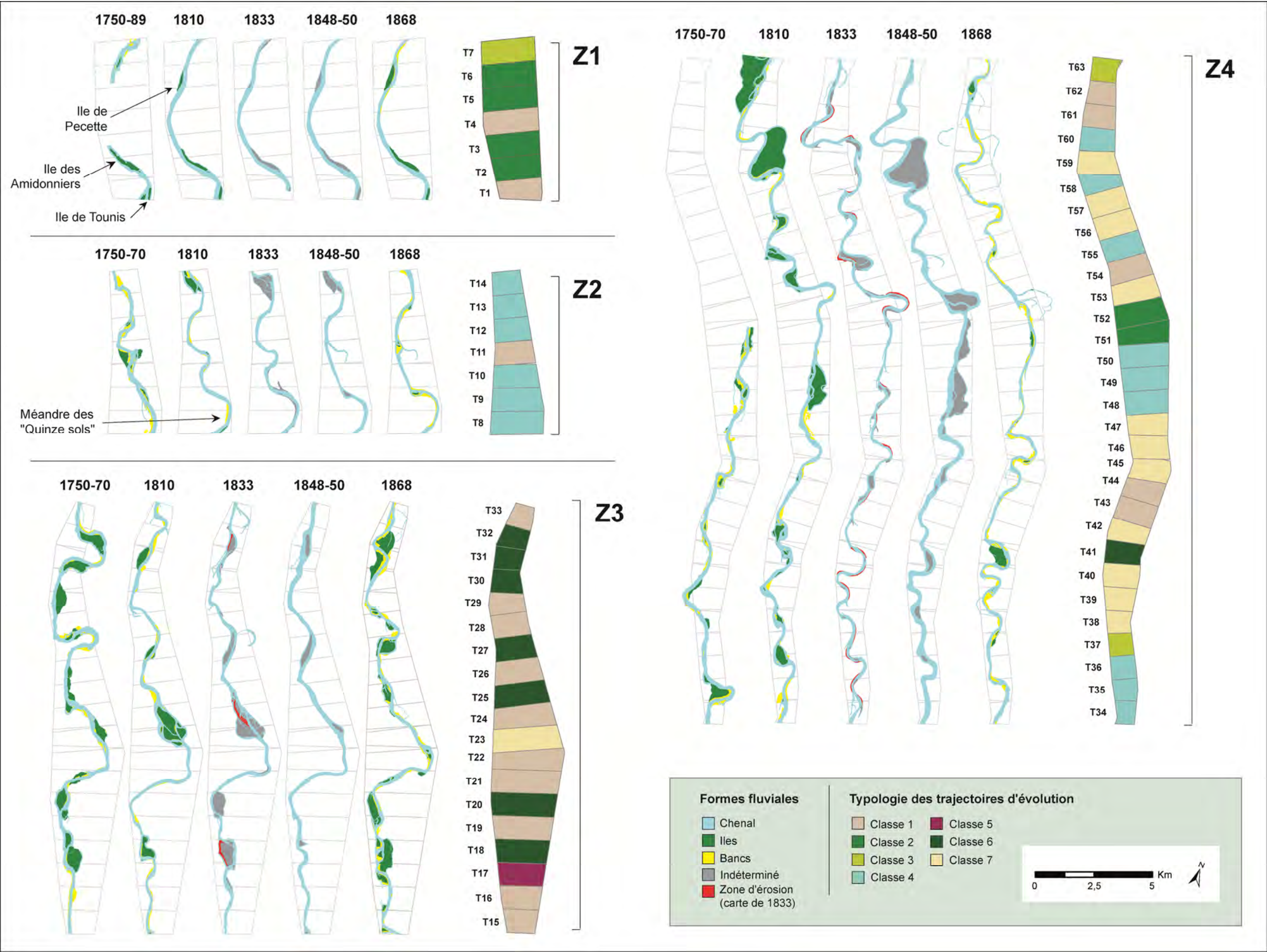


Figure 5.7 : Trajectoire d'évolution des zones Z1 à Z4 entre 1750 et 1868.

5.3.2.4. La zone Z4

Dans la zone Z4, la mobilité particulièrement forte du chenal, attestée pour la période 1868-2000, se retrouve au cours de la période antérieure à 1868 (Fig. 5.8). Le tracé du lit évolue en effet d'une carte à l'autre, par le biais d'ajustements de boucles de méandres (e.g., recoupement dans les tronçons T34-35 entre les années 1750-1770 et 1810 ; translation puis extension dans les tronçons T45-T46 tout au long de la période d'étude ; recoupement dans les tronçons T52-53 entre 1833 et les années 1848-1850 ; etc.). De plus, des barres de méandre sont bien visibles sur la carte de 1810 et de nombreuses zones d'érosion ont été signalées sur la carte de 1833.

Toutefois, les îles végétalisées s'avèrent plus nombreuses, notamment en 1810 et dans les années 1848-1850. Deux types d'îles se distinguent : 1) les îles positionnées en convexité de méandre, qui correspondent à une phase de transition après le recoupement d'un méandre, pendant laquelle l'ancien chenal et le nouveau fonctionnent simultanément (e.g., dans les tronçons T34-T35 dans les années 1750-1770 ou encore dans les tronçons T52-T53 dans les années 1848-1850) et 2) des îles de forme allongée formées au sein de secteurs plus rectilignes et associées à des chenaux secondaires étroits qui se déconnectent par la suite sans avoir remplacé l'écoulement principal (e.g., dans les tronçons T48-T49 en 1810 et dans les années 1848-1850, et dans les tronçons T61-T63 en 1810).

5.4. Conclusion du chapitre 5

L'analyse quantitative univariée des données générées à l'échelle du linéaire (*BD-linéaire*) met en évidence une simplification du linéaire fluvial au cours de la période de 130 ans comprise entre 1868 et les années 2000, notamment traduite par la réduction des surfaces en île dès le début de la période d'étude (perte de 43% des surfaces en île entre 1868 et les années 1940) et par la réduction des surfaces en banc, principalement entre les années 1940 et les années 1970 (perte de 61% des surfaces en banc au cours de cette période). Au total une perte de 90% des surfaces en île et 88% des surfaces en banc est observée entre 1868 et les années 2000.

L'analyse quantitative multivariée (AFMmix et CAH) des données générées à l'échelle des tronçons de mesure (*BD-tronçons*), permet d'établir une typologie dynamique des formes fluviales de la Garonne toulousaine au cours de la période 1868-2000. Sept types d'évolution sont ainsi distingués le long du linéaire, dont certains sont plutôt liés à la présence d'îles de tailles et de formes variées, d'autres à la présence de bancs et d'autres encore à la simplicité morphologique de la bande fluviale, à une ou plusieurs dates d'étude. La spatialisation de cette typologie induit un découpage du linéaire en quatre zones homogènes :

- la zone Z1 (7 km) concerne les communes de Toulouse et Blagnac ;
- la zone Z2 (7 km) correspond à la portion comprise entre Blagnac et Gagnac ;
- la zone Z3 (19 km) correspond à la portion comprise entre Gagnac et Verdun-sur-Garonne ;
- la zone Z4 (30 km) couvre toute la moitié aval du linéaire, entre Verdun-sur-Garonne et Saint-Nicolas-de-la-Grave.

L'analyse qualitative du comportement du chenal au sein de chacune de ces zones confirme l'existence de quatre trajectoires d'évolution distinctes. Par ailleurs, la répétition de cette démarche d'analyse sur la période 1750-1868 à partir des cartes les plus anciennes et les moins précises, révèle une inscription sur le temps long des tendances observées à la fin du XIX^e siècle.

Chapitre 6. - Synthèse des modèles de fonctionnement hydro-sédimentaire, processus d'ajustement et phases d'ajustement, observés au cours de la période 1750-2000

Le travail d'analyse mené sur les cartes historiques a permis de proposer un découpage de la Garonne toulousaine en quatre zones homogènes, chacune caractérisée par une trajectoire d'évolution distincte. Ce travail a aussi mis en évidence un phénomène global d'homogénéisation et de simplification des formes fluviales tout au long de la période d'étude 1868-2000. A partir de ces données, ce chapitre propose une synthèse : des différents modèles de fonctionnement hydro-sédimentaires reconnus (1) ; des processus par lesquels l'homogénéisation / la simplification du linéaire s'est produite au cours du XX^e siècle (2) et des phases d'ajustement observées au cours de la période 1750-2000 (3).

6.1. Modèles de fonctionnement hydro-sédimentaire

Le travail d'analyse qualitative des cartes historiques (cf. 5.3) montre que le découpage du linéaire en quatre zones dépend fortement des formes fluviales visibles sur la carte de 1868, qui semblent se retrouver sur la période antérieure (1750-1868). Ces formes sont révélatrices de modèles de fonctionnement hydro-sédimentaire distincts, qui sont ici synthétisés sur la base de quatre attributs (Fryirs et Brierley, 2013), mesurés à l'échelle des zones (Fig. 6.1) :

- le taux de migration du chenal (MI, en m/an) est calculé au sein de chaque tronçon de mesure entre 1868 et les années 1940 ;
- la sinuosité du chenal (SI) correspond au ratio entre la longueur du chenal et la longueur de la ligne droite reliant les deux extrémités du chenal en 1868 ;
- le degré d'alluvionnement (A, en %) correspond au ratio entre la surface occupée par les bancs et l'aire de la bande fluviale en 1868 ;
- le degré de tressage (B) correspond au nombre moyen de chenaux actifs par transect de mesure en 1868 (Ashmore, 1991).

Nous distinguons ainsi de l'amont vers l'aval (Figs. 6.1) :

- *Un chenal unique et sinueux stable* dans la zone Z1 (7 km). Dans cette zone, le chenal se caractérise par un taux de migration très réduit ($MI < 1,5$ m/an) ; une sinuosité inférieure à 1,25 ($SI=1,18$) et des formes fluviales relativement simples (peu d'îles et de bancs : $A = 5,28\%$ et $B=1,43$).
- *Un chenal unique et sinueux, marqué par des ajustements latéraux lents* dans la zone Z2 (7 km). Malgré les valeurs relativement faibles de migration ($MI \text{ max.} = 3,12$ m/an) et de sinuosité ($SI = 1,22$), cette zone se démarque par la présence de bancs de convexité ($A = 15,74\%$), qui mettent en évidence une migration latérale plus lente que dans les zones situées en aval.
- *Un chenal à bras multiples et sinueux, marqués par des ajustements latéraux significatifs* dans la zone médiane (Z3 - 19 km). Cette zone se caractérise avant tout par la présence de nombreuses îles végétalisées, mises en évidence par un degré de tressage relativement fort ($B=1,8$), qui reste encore nettement inférieur au seuil de tressage ou d'anastomose. Le chenal est aussi très sinueux dans cette zone ($SI=1,32$) et sujet à une migration latérale relativement forte ($MI \text{ max.} = 7$ m/an). La présence de bancs est ici dissimulée par la largeur de la bande fluviale, qui en proportion, conduit à une valeur d'alluvionnement réduite ($A = 6,81\%$).

- *Un chenal unique et sinueux, marqué par des ajustements latéraux significatifs dans la zone aval du linéaire (Z4 - 30 km). Cette zone se caractérise par un chenal très sinueux (SI=1,39), sujet à des ajustements latéraux (MI max. = 15 m/an), notamment des ajustements de boucle de méandre formant de grands bancs de convexité (A = 19,46%).*

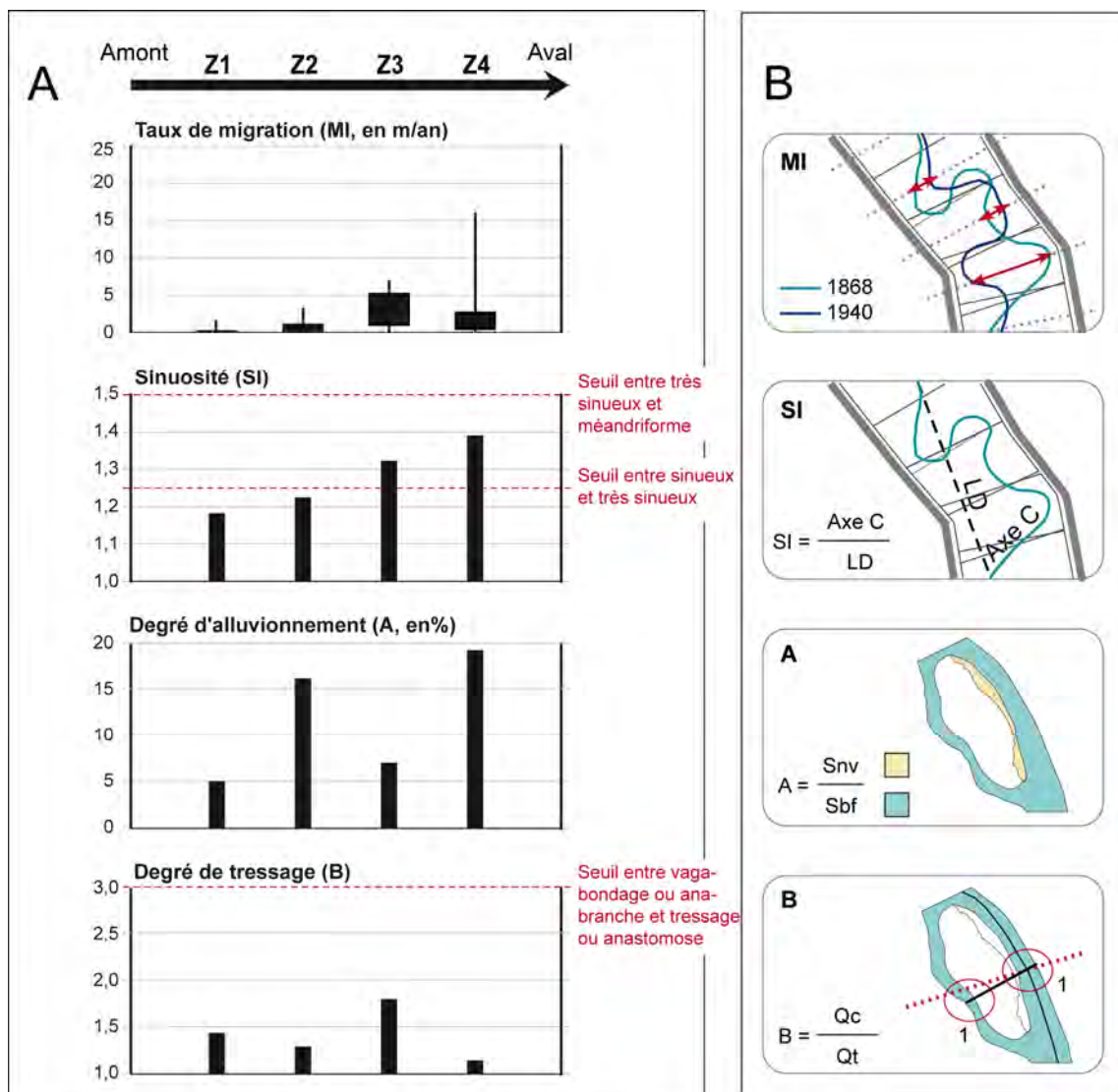


Figure 6.1 : Représentation synthétique des quatre modèles de fonctionnement hydro-sédimentaire via quatre indices. A - Valeurs estimées pour chaque zone. B - Méthode de calcul des indices. MI : Taux de migration entre 1868 et les années 1940 ; SI : Sinuosité en 1868 ; A : Degré d'alluvionnement en 1868 ; B : Degré de tressage en 1868.

6.2. Processus impliqués dans l'ajustement des modèles fluviaux

L'analyse des cartes historiques a révélé une homogénéisation des formes fluviales au cours de la période 1868-2000. Les modèles décrits précédemment ont en effet évolué vers des formes fluviales plus simples et plus stables. Cette évolution peut être observée pour chaque zone à partir des trois indices de migration, alluvionnement et tressage abordés précédemment (Fig. 6.2) :

- le taux de migration du chenal (MI, en m/an) est calculé au sein de chaque tronçon de mesure pour les trois périodes distinctes 1868-1940, 1940-1970 et 1970-2000 ;
- le degré d'alluvionnement (A, en %), correspondant au ratio entre la surface occupée par les bancs et l'aire de la bande fluviale est calculé à chaque date entre 1868 et les années 2000 ;
- le degré de tressage (B), correspondant au nombre moyen de chenaux actifs par transect de mesure est aussi calculé à chaque date entre 1868 et les années 2000 (Ashmore, 1991).

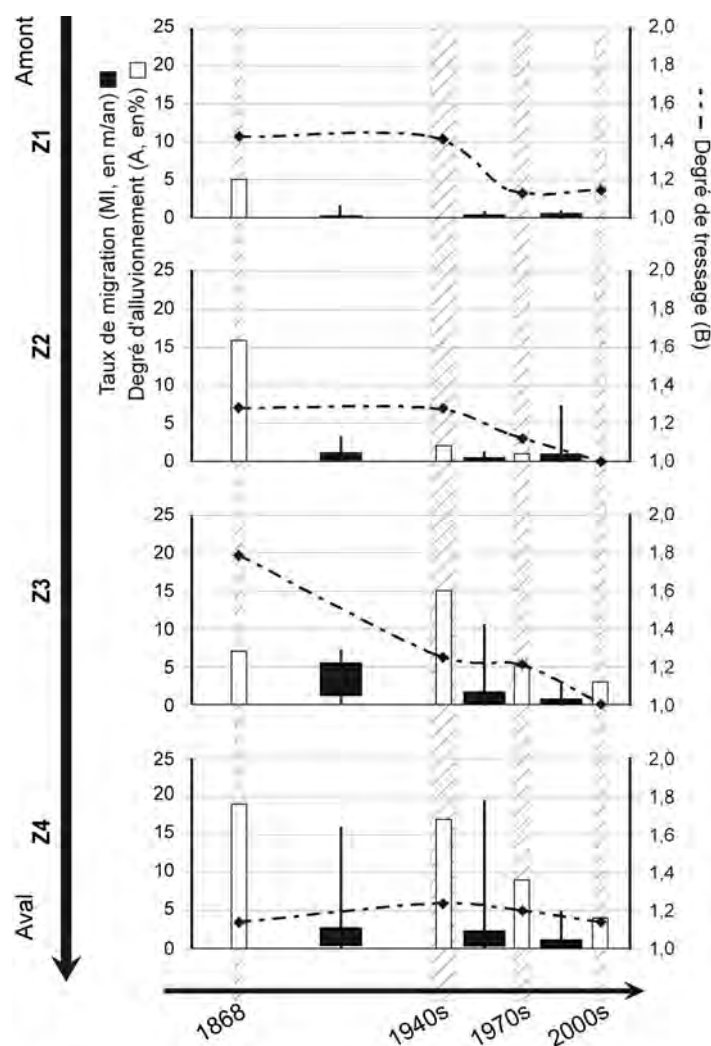


Figure 6.2 : Evolution des différentes zones au regard de trois indices. MI : Taux de migration ; A : Degré d'alluvionnement ; B : Degré de tressage.

Sur la base des données issues de l'analyse qualitative (cf. 5.3.1), il est possible de distinguer trois processus d'ajustement majeurs à l'origine de cette évolution (Fig. 6.3) :

- *L'évacuation et la végétalisation des bancs.* La disparition progressive des bancs (-2,6 km² en 130 ans), principalement ressentie dans la zone Z2 entre 1868 et les années 1940 et dans les zones Z3 et Z4 après les années 1940 (Fig. 6.2 - degré d'alluvionnement), est en effet due en partie à l'évacuation des dépôts alluviaux, interprétée comme telle sur observation d'un élargissement ponctuel du chenal en eau (e.g., Fig. 6.3-A-T38-T40,) ; et en partie à leur colonisation par la végétation,

interprétée comme telle sur reconnaissance de la géométrie des formes d'une carte à l'autre (e.g., Fig. 6.3-A-T32-T33,). L'évacuation et la végétalisation des bancs sont des phénomènes courants dans les rivières alluviales sinueuses. Cependant, dans ce cas précis, les sorties de sédiment n'ont pas été compensées par de nouveaux apports, ce qui reflète un déficit en charge solide à l'échelle du linéaire/bassin versant.

- *Le rattachement à la berge et l'érosion des îles.* La disparition des îles, clairement mise en évidence par l'évolution de l'indice de tressage dans les zones amont (Z1 et Z2) et médiane (Z3) (Fig. 6.2 - degré de tressage), est principalement due à leur rattachement à la berge sous l'effet de la déconnexion des chenaux secondaires (e.g., Fig. 6.3-B-T32-T33). Par ailleurs, certaines îles semblent aussi avoir été progressivement érodées sous l'effet de la migration du chenal (e.g., Fig. 6.3-B-T21-T22).
- *La stabilisation du chenal.* La stabilisation du chenal est bien mise en évidence par la réduction des taux de migration dans la zone médiane (Z3) après les années 1940 et dans la zone aval (Z4) après les années 1970 (Fig. 6.2). Elle se traduit par le maintien de la position du lit d'une carte à l'autre (e.g., 6.3-C-T45-T47)

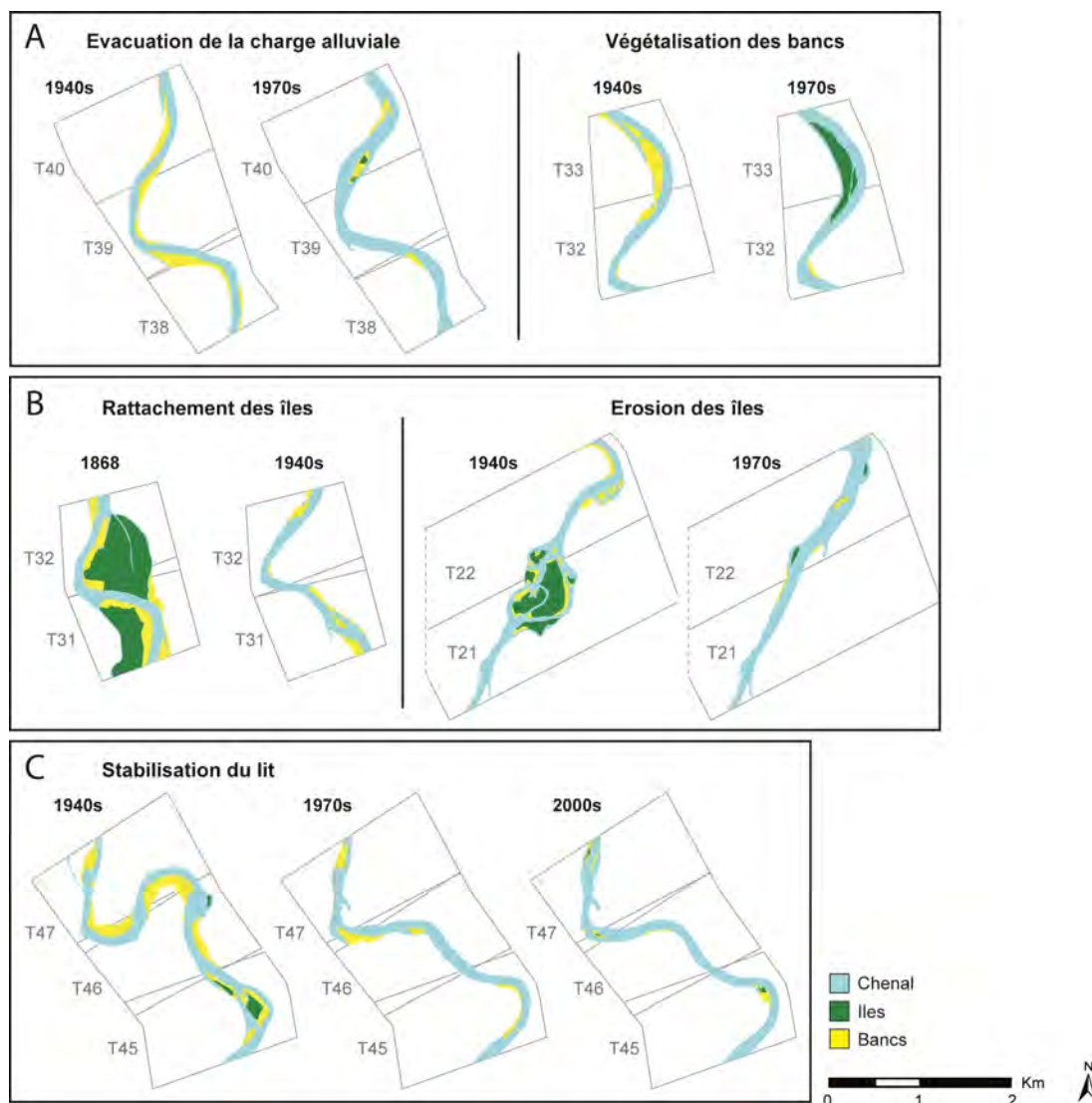


Figure 6.3 : Processus par lesquels les modèles fluviaux se sont homogénéisés et simplifiés. A - Réduction des surfaces en île. B - Réduction des surfaces en banc. C - Stabilisation du chenal.

6.3. Chronologie de l'ajustement des modèles fluviaux

L'évolution décrite précédemment (simplification, homogénéisation et stabilisation des formes fluviales) a suivi un rythme différent d'une zone à l'autre. Il en ressort un gradient amont/aval (Figs. 6.2 et 6.4).

Le comportement du chenal dans les zones amont (Z1 et Z2) et médiane (Z3) a commencé à changer dès le début de la période 1868-2000 (entre 1868 et les années 1940), avec le rattachement des îles à la berge et l'évacuation des bancs dans la zone Z1 ; la disparition des bancs et leur colonisation par la végétation dans la zone Z2 ; et le rattachement des îles à la berge ou plus généralement, la disparition du modèle fluvial à bras multiples, dans la zone Z3.

Dans la zone aval (Z4), le comportement du chenal n'a évolué qu'au cours de la seconde moitié du XX^e siècle, avec la réduction des ajustements latéraux et l'évacuation/la végétalisation des bancs.

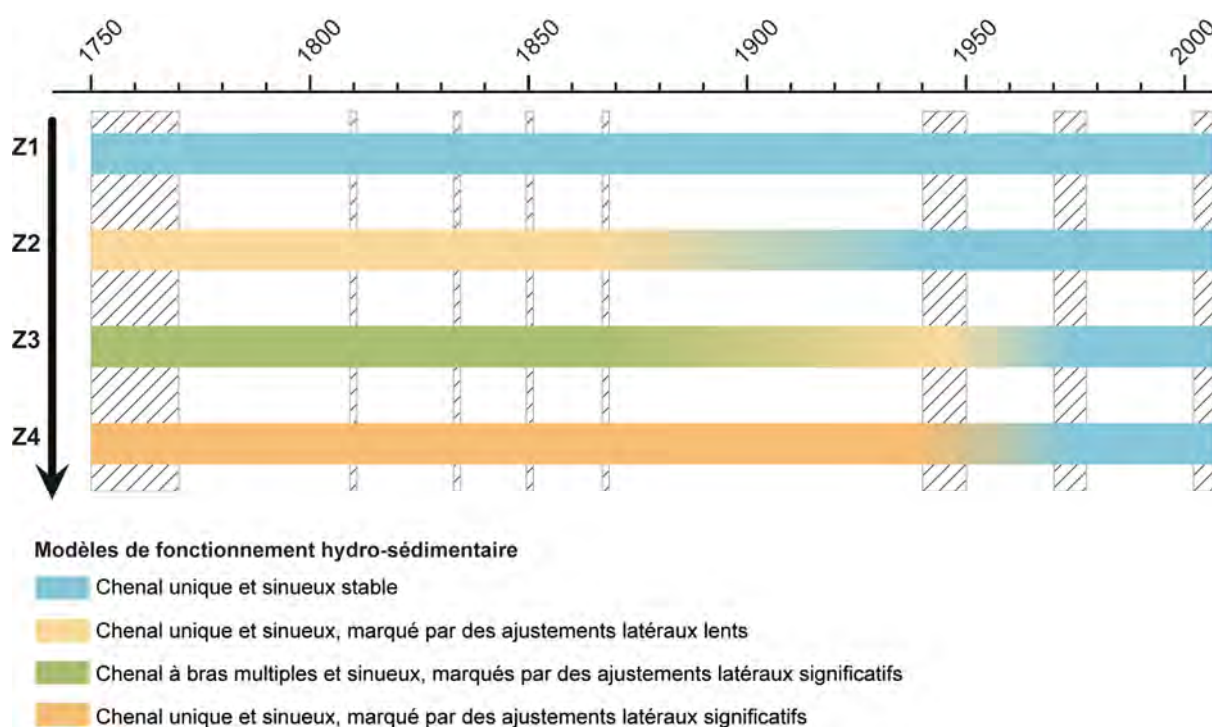


Figure 6.4 : Chronologie de l'évolution des modèles de fonctionnement hydro-sédimentaire.

6.4. Conclusion du chapitre 6

La synthèse des résultats de l'étude des cartes historiques révèle une organisation du linéaire selon quatre modèles de fonctionnement hydro-sédimentaire distincts jusqu'à la fin du XIX^e / le début du XX^e siècle :

- *Un chenal unique et sinueux stable* dans la zone Z1 (7 km) ;
- *Un chenal unique et sinueux, marqué par des ajustements latéraux lents* dans la zone Z2 (7 km) ;
- *Un chenal à bras multiples et sinueux, marqués par des ajustements latéraux significatifs* dans la zone médiane (Z3 - 19 km) ;
- *Un chenal unique et sinueux, marqué par des ajustements latéraux significatifs* dans la zone aval (Z4 - 30 km).

Au cours du XX^e siècle, le phénomène de simplification et d'homogénéisation du chenal quantifié dans le chapitre précédant (5.1) s'est traduit par trois processus dominants :

- l'évacuation et la végétalisation des bancs ;
- l'érosion et le rattachement à la berge des îles ;
- la stabilisation du chenal.

Ce changement fluvial a suivi une progression amont/aval, avec :

- une amorce dans les zones amont et médiane dès la période 1868-1940s ;
- une apparition plus tardive dans la zone aval, entre les années 1940 et les années 1970.

Conclusion de la Partie 2

Le premier volet des travaux réalisés sur la dynamique fluviale de la Garonne dans le cadre de cette thèse, repose sur un corpus de neuf cartes historiques couvrant la période 1750-2000. Chacun de ces documents a été géoréférencé et a fait l'objet d'une digitalisation des formes fluviales sous SIG.

Au sein de ce corpus, quatre cartes se sont distinguées par leur précision et leur niveau de détail (1868 ; 1940s ; 1970s et 2000s). A partir de ces documents, une analyse géomorphométrique des formes fluviales a été réalisée. Pour cela, la plaine de la Garonne toulousaine a été segmentée en tronçons de mesure de 1 km de longueur sous SIG. A partir de cette grille, neuf indices géomorphométriques ont été calculés à chaque date et à intervalle régulier le long du linéaire. Une première base de données diachronique (*BD-tronçons*) a ainsi été établie. Les calculs ont ensuite été répétés à l'échelle du linéaire afin de générer une seconde base de données diachronique plus globale (*BD-linéaire*).

A partir de ces données, trois niveaux d'analyse ont été abordés :

- 1) La base de données réalisée à l'échelle du linéaire (*BD-linéaire*) a été traitée par analyse quantitative univariée classique. Cette démarche a mis en évidence une réduction globale de la dynamique fluviale de la Garonne au cours de la période 1868-2000.
- 2) La base de données réalisée à l'échelle des tronçons de mesure (*BD-tronçons*) a été traitée par analyse factorielle multiple mixte (AFMmix) et classification ascendante hiérarchique (CAH). Cette approche, à la fois multivariée et diachronique, a permis d'établir une typologie dynamique des formes fluviales au cours de la période 1868-2000. Sur la base de cette typologie dynamique, une segmentation du linéaire en quatre zones homogènes a été établie.
- 3) L'analyse qualitative des formes et ajustements fluviaux au sein de chacune de ces zones, d'abord sur la période 1868-2000, puis sur la période 1750-1868, a confirmé l'existence de quatre trajectoires d'évolution distinctes.

Ces résultats révèlent ainsi un linéaire fragmenté jusqu'à la fin du XIX^e siècle / le début du XX^e siècle, marqué par quatre modes de fonctionnement hydro-sédimentaires distincts. Au cours du XX^e siècle, plusieurs processus géomorphologiques ont été observés (végétalisation et évacuation des bancs, rattachement des îles à la berge et stabilisation du chenal), qui ont conduit à une homogénéisation et une simplification progressives du linéaire, suivant un gradient amont/aval.

Partie 3 – Caractérisation des paléochenaux de la Garonne toulousaine : topographie, tomographies de résistivité électrique (TRE) et données sédimentaires

L'objectif de cette partie est de compléter les évolutions en plan observées à partir des cartes historiques (Partie 2), en s'appuyant sur des données issues de travaux de terrain menés sur différents paléochenaux de la Garonne toulousaine. Il s'agit notamment d'allonger la période d'observation et de se libérer ainsi de « l'effet de sources » cartographiques. Il s'agit par ailleurs d'appréhender la dimension verticale qui est absente des données cartographiques.

Le premier chapitre (Chapitre 7) détaille la démarche méthodologique mise en œuvre pour acquérir et traiter les données de terrain. Le deuxième chapitre (Chapitre 8) présente les données recensées et propose quelques éléments d'interprétation concernant la géométrie des paléochenaux et leur remplissage sédimentaire. Le troisième chapitre (Chapitre 9) propose enfin une mise en perspective de l'ensemble des données afin d'identifier des disparités spatiales et/ou temporelles en termes de capacité hydraulique, phase de déconnexion et évolution post-déconnexion des chenaux.



Philippe et Delphine Valette

Chapitre 7. - Démarche méthodologique mise en œuvre pour l'étude des paléochenaux de la Garonne toulousaine

Le chapitre 7 vise à présenter les outils et méthodes utilisés pour l'étude des paléochenaux de la Garonne toulousaine. Ce travail a pour partie fait l'objet d'une publication dans la revue *Géomorphologie : relief, processus, environnement* pour le secteur de Grenade/Ondes (David et al., 2015).

Les sites d'étude sont d'abord présentés (1), répartis dans trois secteurs entre Toulouse et la confluence du Tarn : Grenade/Ondes, Verdun-sur-Garonne/Dieupentale et Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier. La démarche d'acquisition et de traitement des données de terrain est ensuite détaillée (2), incluant les carottages et les analyses sédimentaires menées sur les carottes (granulométrie laser et perte au feu), l'acquisition et l'inversion des mesures de résistivité électrique et l'acquisition des données topographiques (DGPS, théodolite et modèle numérique de terrain - MNT - haute résolution). La démarche d'interprétation des données récoltées est enfin exposée (3). Elle se décline en une analyse de la géométrie hydraulique des chenaux (estimation des capacités paléohydrauliques, stades de comblement et vitesses de sédimentation) et une analyse du remplissage sédimentaire (caractérisation des environnements et processus de dépôts).

Avant propos sur la démarche méthodologique mise en œuvre

Pour des raisons logistiques, l'acquisition des données de terrain a suivi une logique de mise en contexte progressive, allant de la donnée la plus localisée à la donnée la plus globalisante (Fig. 7.1), avec par ordre chronologique : 1) le prélèvement de carottes sédimentaires au sein des paléochenaux ; 2) la levée de tomographies de résistivité électrique (TRE) en travers des paléochenaux et 3) l'acquisition d'un modèle numérique de terrain (MNT) haute résolution couvrant la vallée de la Garonne.

Cette démarche étant contraire aux préconisations dans ce type d'approche, l'interprétation des données de terrain suit une logique inverse (Fig. 7.1), avec : 1) l'analyse de la topographie de surface sur MNT haute résolution dans le but d'identifier et de mesurer l'empreinte des paléochenaux dans le paysage ; 2) l'étude des corps sédimentaires et la délimitation du fond des formes à partir des TRE et 3) la caractérisation du mode de remplissage des paléochenaux par l'analyse des logs sédimentaires (lithofaciès, granulométrie et teneur en carbone).

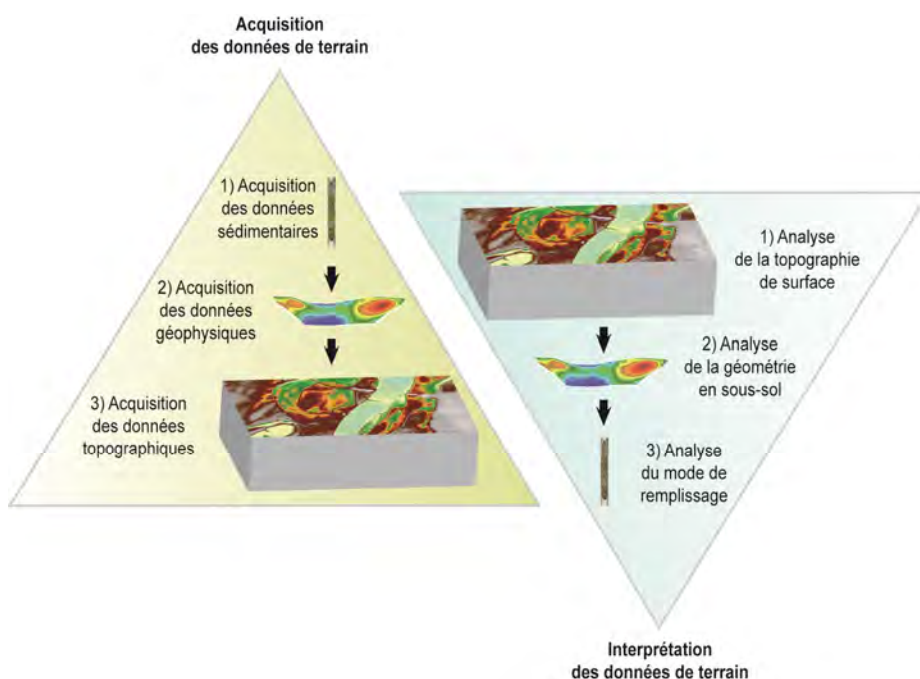


Figure 7.1 : Démarche d'analyse multiscalaire mise en œuvre dans la partie 3.

7.1. Présentation des secteurs et sites d'étude

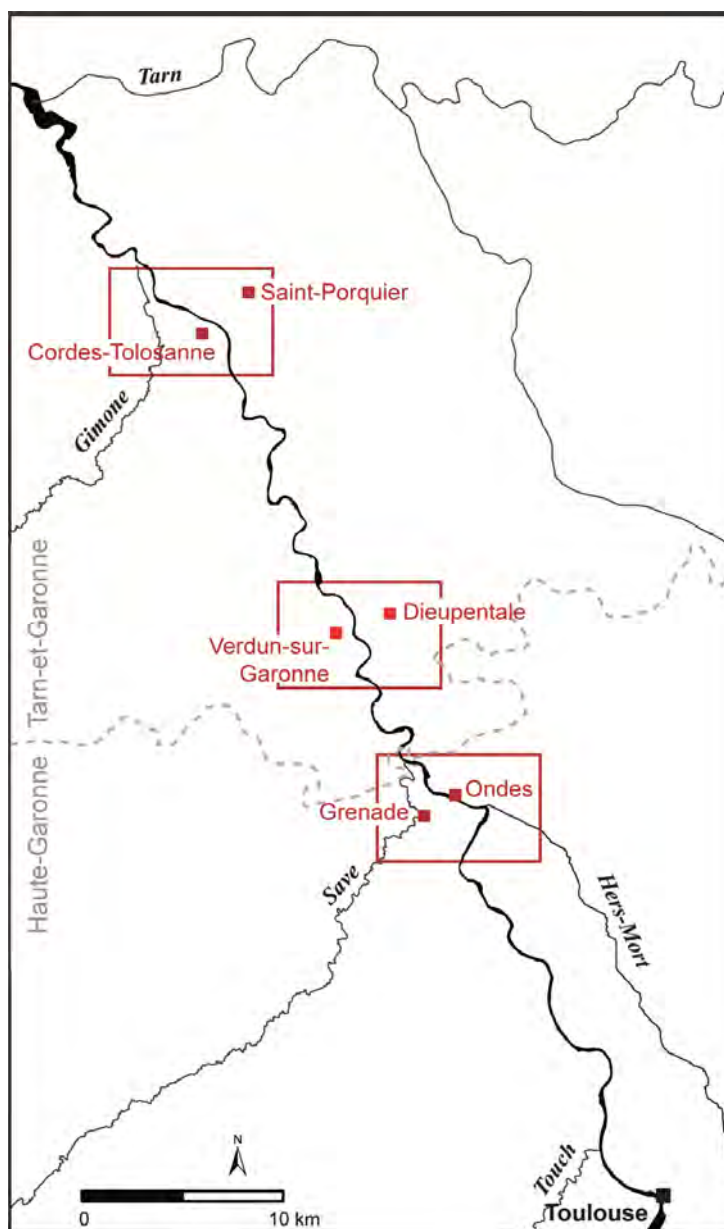
Pour des raisons organisationnelles, les secteurs d'acquisition des données de terrain ont dû être choisis avant la finalisation du travail d'analyse géomorphométrique mené sur les cartes historiques (Partie 2). De ce fait, la stratégie de sélection ne repose pas sur le découpage du linéaire en quatre zones caractérisées par des trajectoires d'évolution distinctes au cours de la période 1868-2000.

Les secteurs d'étude ont été prioritairement choisis pour la quantité et la qualité des sources d'archives disponibles, susceptibles de fournir au mieux des renseignements sur la dynamique fluviale de la Garonne au cours des derniers siècles : anciens chenaux représentés en eau sur les cartes historiques géoréférencées ; empreintes de paléochenaux visibles sur les photographies aériennes ou dans le parcellaire et toponymes indicateurs de dynamique fluviale dans la plaine. Trois secteurs ont ainsi été retenus au sein du linéaire compris entre Toulouse et la confluence du Tarn : Grenade/Ondes, Verdun-sur-Garonne/Dieupentale et Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier (Fig. 7.2).

Le premier secteur sondé, Grenade/Ondes, se situe dans la zone médiane Z3 définie par l'analyse géomorphométrique des cartes historiques (cf. Partie 2). Le secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale se situe au point de transition entre les zones Z3 et Z4 et le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier se situe dans la zone aval Z4. Aucun secteur n'a pu être choisi plus en amont en raison de la forte urbanisation de la plaine et de la faible mobilité historique du chenal dans cette partie du linéaire. Les zones Z1 et Z2 ne sont donc pas représentées par les données de terrain.

Sur chacun des trois secteurs d'étude, une série de paléochenaux (sites d'étude) a été identifiée afin d'y acquérir un certain nombre de données de terrain. Les paléoformes fluviales choisies se répartissent le long d'un transect perpendiculaire à la basse plaine, afin de couvrir la zone de divagation récente du fleuve.

Figure 7.2 : Localisation des secteurs d'étude le long de la Garonne toulousaine.



7.1.1. Le secteur de Grenade/Ondes

Le secteur de Grenade/Ondes se situe à 23 km au N-NO de Toulouse, à l'extrémité nord de la Haute-Garonne (Fig. 7.3). Ce secteur présente le double avantage d'être bien renseigné par les sources d'archive (séries C et S Archives Départementales ; séries F10 et F14 Archives Nationales) et d'avoir fait l'objet d'une étude antérieure sur les aménagements et modes de gestion (Valette et Gazelle, 2000). Etant le premier secteur sondé, il a servi de référence/test pour affiner la méthode d'acquisition des données (cf. David et al., 2015).



Figure 7.3 : Photographie aérienne et limites administratives du secteur de Grenade/Ondes (source : Géoportail). Les points jaunes correspondent aux sites d'étude.

Dans ce secteur, la confluence Hers-Garonne forme une basse plaine particulièrement large (4 km), limitée par un talus de terrasse haut de 8 à 10 m en rive gauche et par une rupture de pente plus douce en rive droite (Fig. 7.4). La bastide de Grenade a été bâtie en 1290 sur la terrasse rive gauche et a longtemps représenté un site stratégique pour le commerce fluvial, en raison de sa position à la confluence de la Save (Rumeau, 1879 ; Claverie, 1879). La commune d'Ondes, qui apparaît aussi dans les textes d'archive depuis le XIII^e siècle (1258), a été bâtie en basse plaine rive droite et a de ce fait été détruite par la crue centennale de 1875 (Maire de Ondes).

Entre Grenade et Ondes, le lit mineur s'écoule à proximité du talus de terrasse rive gauche (Fig. 7.4) et présente une largeur de 170 m pour une profondeur de 6 m au niveau du pont (Lambert, 1988), soit des valeurs légèrement supérieures à la moyenne du linéaire Toulouse/confluence du Tarn (largeur : 150 m . profondeur : 4 m - Steiger et Corenblit, 2000). Au niveau de la confluence Hers-Garonne, le chenal décrit un coude de 4,5 km de longueur d'onde et d'amplitude 2,3 km au sein d'une *bassure* (basse plaine régulièrement inondée, cf. 2.2.1) large de 2 km au maximum. La pente du profil en long est ici égale à la pente moyenne de la Garonne toulousaine (0,0005 m/m, d'après le profil en long de 1987,

IGN, PROFILS) et contrairement à la portion Tarn-et-Garonnaise incluant les deux autres secteurs d'étude, ici les berges de la Garonne sont peu aménagées.

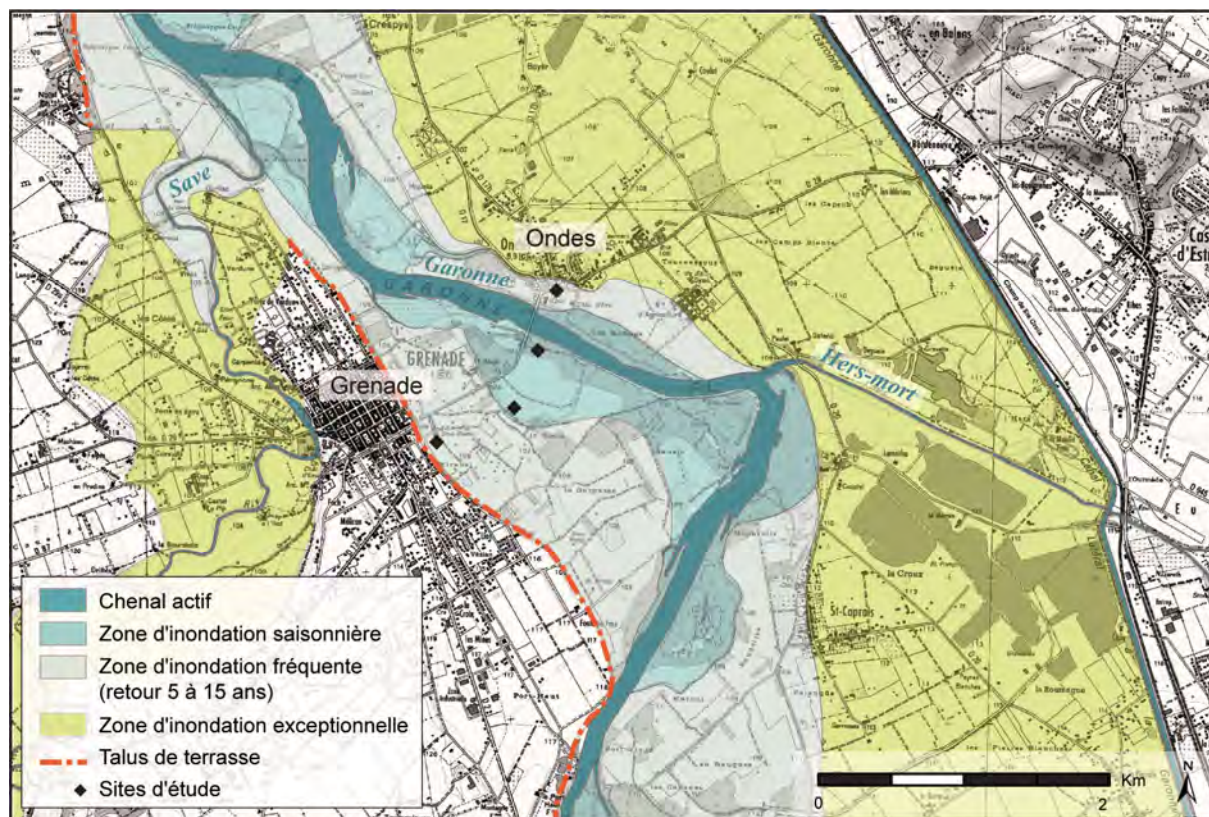


Figure 7.4 : Organisation hydro-géomorphologique du secteur de Grenade/Ondes (sources : Géoportail et Lambert, 1988).

Les cartes historiques montrent que ce secteur a été marqué par la présence d'îles du XVIII^e siècle aux années 1940, avec notamment la formation d'un système à chenaux multiples au début du XIX^e siècle (cartes de 1810 et 1833 - Figs. 7.5 et 7.6). Ce système a fait l'objet d'aménagements visant à favoriser l'atterrissement des bras secondaires par la mise en place de traînées dans les années 1818-1836, qui n'ont eu qu'une efficacité partielle (Valette et Gazelle, 2000 - Fig. 7.5). Sur la carte de 1868, les chenaux secondaires qui composent ce système ont tous disparus et les cartes ultérieures révèlent la stabilisation progressive du chenal (Fig. 7.6). Outre cet épisode de tressage, les cartes historiques montrent aussi une extension progressive de la boucle de méandre à la confluence Hers-Garonne jusque dans les années 1970.

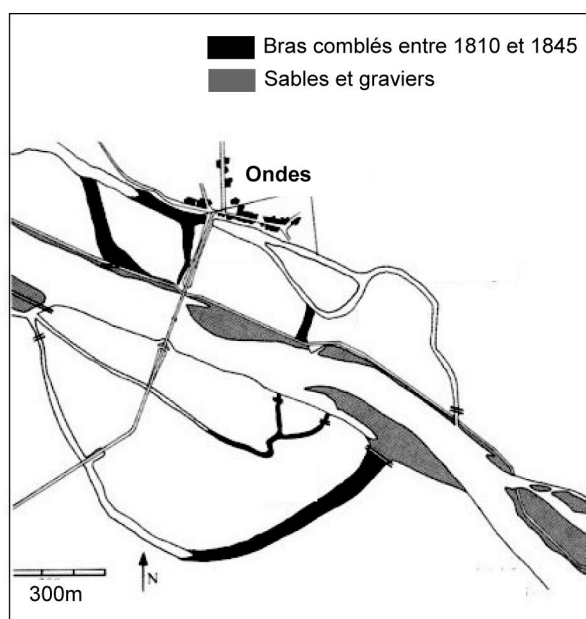


Figure 7.5 : Fermeture de bras secondaires dans le secteur de Grenade/Ondes (modifié d'après Valette et Gazelle, 2000).

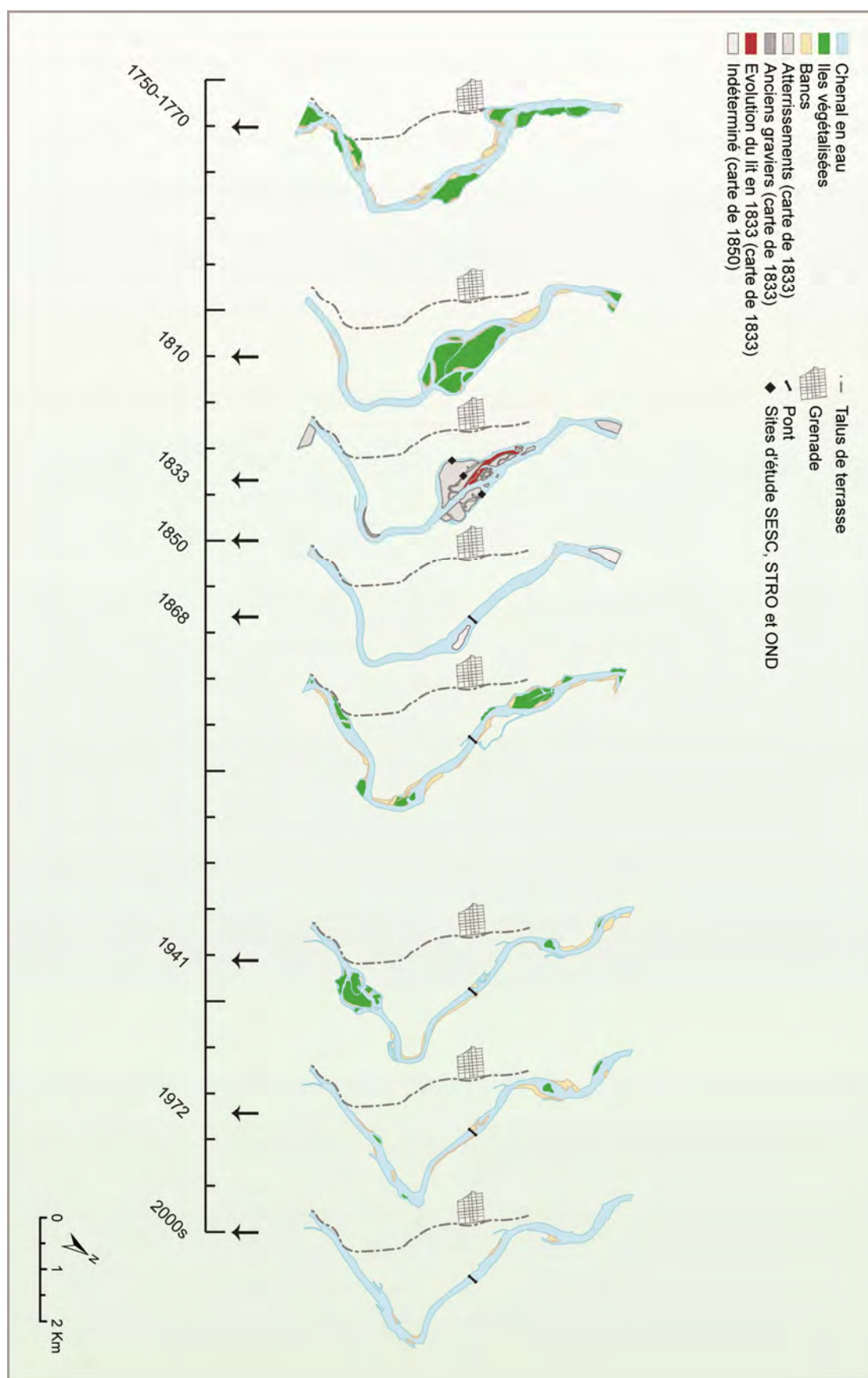


Figure 7.6 : Evolution en plan du chenal dans le secteur de Grenade/Ondes, reconstituée à partir des cartes historiques présentées dans le chapitre 4.

Quatre paléoformes fluviales ont été choisies pour être étudiées dans le secteur de Grenade/Ondes, organisées suivant un transect proximal distal par rapport au chenal actuel (Fig. 7.7) :

- GRE (pour Grenade), qui se situe dans un pré non cultivé, au pied du talus de terrasse rive gauche, à plus d'1 km du lit actuel de la Garonne ;
- SESC (pour le lieu-dit *le Sescà*), qui se situe dans un champs cultivé (maïs) dans la plaine rive gauche, à environ 600 m du lit de la Garonne ;
- STRO (pour le lieu-dit *Saint-Roch*), qui correspond à une plantation relativement récente d'arbustes à proximité de la Garonne (environ 200 m) en rive gauche ;
- OND (pour Ondes), qui se situe dans un champ cultivé (maïs), situé à un peu plus de 250 m de la Garonne, au pied de la commune d'Ondes, en rive droite.

Le site GRE correspond à un paléochenal de la Garonne antérieur à la période renseignée par les cartes, dont la présence a été déduite des anomalies parcellaires ainsi que du toponyme « Quai de Garonne » à Grenade, en bordure de la terrasse. Les sites OND, SESC et STRO correspondent à trois bras secondaires du système à chenaux multiples observé sur les cartes historiques de la première moitié du XIX^e siècle. Ces sites ont été localisés à partir de la carte de 1833 géoréférencée (Fig. 7.6).

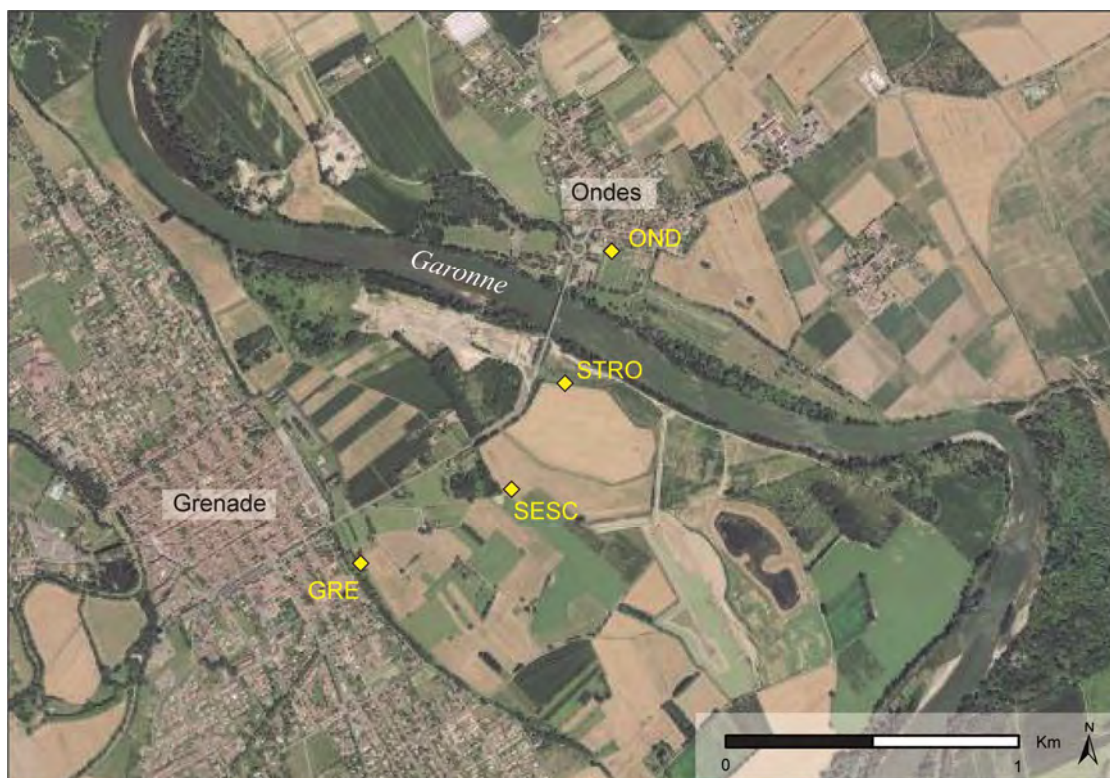


Figure 7.7 : Position des sites d'étude du secteur de Grenade/Ondes.

7.1.2. Le secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale

Le second secteur d'étude concerne principalement la commune de Verdun-sur-Garonne, située à 32 km au N-NO de Toulouse, dans le département du Tarn-et-Garonne (Fig. 7.8). Le centre urbain de Verdun-sur-Garonne se situe sur la terrasse rive gauche mais les limites de la commune s'étendent jusqu'au bâti de la commune de Dieupentale, au pied du talus de terrasse rive droite. Les deux communes sont présentes dans les textes d'archive depuis le X^e siècle (Passerat, 1991) et l'histoire de Verdun-sur-Garonne est

marquée par le développement d'un port fluvial en 1175. La Garonne a par ailleurs longtemps présenté un fond peu profond dans ce secteur, permettant sa traversée.



Figure 7.8 : Photographie aérienne et limites administratives du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale (source : Géoportail). Les points jaunes correspondent aux sites d'étude.

Bien que la *bassure* soit de largeur équivalente à celle du secteur de Grenade-Ondes (2 km max.), la basse plaine est ici étroite, avec seulement 2,6 km de largeur au niveau du pont entre Verdun-sur-Garonne et Dieupentale (Fig. 7.9). Le chenal est aussi plus étroit et plus profond qu'à Grenade/Ondes (118 m de largeur pour 5,5 m de profondeur au niveau du pont, Sauvage, 1999). Il forme par ailleurs une succession de sinuosités d'amplitudes nettement inférieures au méandre de la confluence Hers-Garonne et sa pente est hétérogène. Elle présente en effet un gradient faible à l'amont du pont (0,0005 m/m) et un gradient plus fort à l'aval (0,0012 m/m - IGN, PROFILS).

Dans ce secteur, les berges du chenal ont été stabilisées au cours de quatre tranches de travaux distinctes entre 1960 et 1984 (cf. 2.2.4, Fig. 2.13) : 1) la campagne de 1962 (2^e tranche) a concerné le secteur situé à l'amont du pont et a consisté en "la régularisation de la forme des berges par l'intermédiaire d'enrochements localisés en différents endroits" ; 2) la campagne de 1974-1976 (9^e tranche) a consisté en "l'établissement d'enrochements sur deux berges concaves" à l'aval de Verdun-sur-Garonne, complétés par "l'établissement d'épis pour rattacher l'île des environs de Pescay à la rive droite" ; 3) la campagne de 1980 (12^e tranche) a concerné le secteur de Sagnac (Commune de Verdun-sur-Garonne - extrémité sud du secteur d'étude) et a "permis la fixation de berges concaves à l'aide d'enrochements et d'épis" et 4) la dernière campagne, qui a eu lieu en 1984 (14^e tranche) a permis de fixer la berge de la rive gauche à l'aide d'enrochements (citations de Valette, 2002).

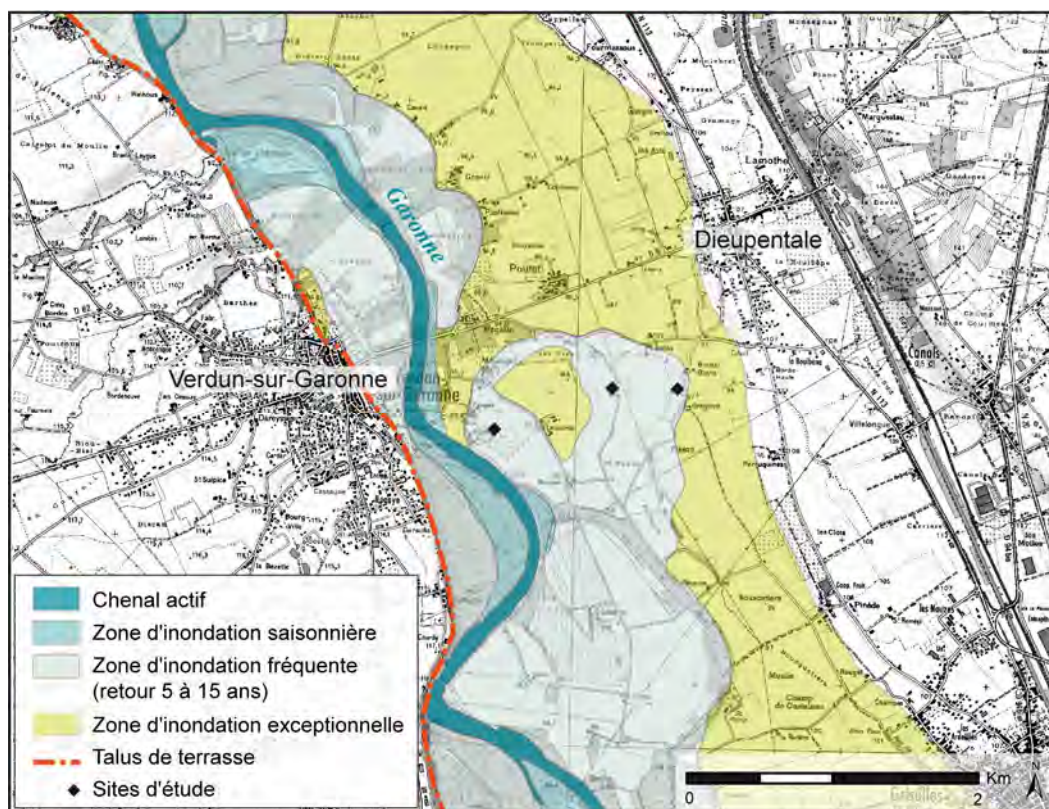


Figure 7.9 : Organisation hydro-géomorphologique du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale (sources : Géoportail et Lambert, 1988).

Les cartes historiques (Fig. 7.10) révèlent la présence de deux grandes boucles de méandre dans les années 1750-1770, déconnectées du chenal principal avant le début du XIX^e siècle. Au cours du XIX^e siècle, l'évolution du tracé, les différentes zones d'érosion (carte de 1833) et les nombreux bancs alluviaux visibles traduisent la forte mobilité du chenal. Les cartes de 1941, 1972 et des années 2000 révèlent ensuite la végétalisation/l'évacuation progressive des bancs alluviaux au cours du XX^e siècle, en même temps qu'une stabilisation du chenal se produit. Il faut par ailleurs noter que les îles ponctuellement observées dans le secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale se distinguent tout au long de la période d'étude de celles observées dans le secteur de Grenade/Ondes par un positionnement systématique en convexité de méandre.

Trois paléoformes fluviales, situées en rive droite de la Garonne, ont été choisies pour être étudiées dans le secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale (Fig. 7.11). Ces formes sont encore visibles sur les photographies aériennes et dans le parcellaire mais elles n'apparaissent pas en eau sur les cartes historiques. Elles correspondent donc toutes les trois à des chenaux antérieurs à la moitié du XVIII^e siècle. Comme pour les paléochenaux du secteur de Grenade/Ondes, les formes sondées dans le secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale ont été nommées en fonction des lieux-dits situés à proximité :

- PLUM (pour *Plumet*), qui se situe en marge d'une plantation de kiwi, à environ 250 m du lit de la Garonne ;
- MAG (pour *Magasin*), qui se situe dans un champ cultivé (maïs) à 1 km de la Garonne ;
- JUL (pour *Julias*), qui se situe aussi dans un champ cultivé (maïs), à plus d'1,3 km de la Garonne.

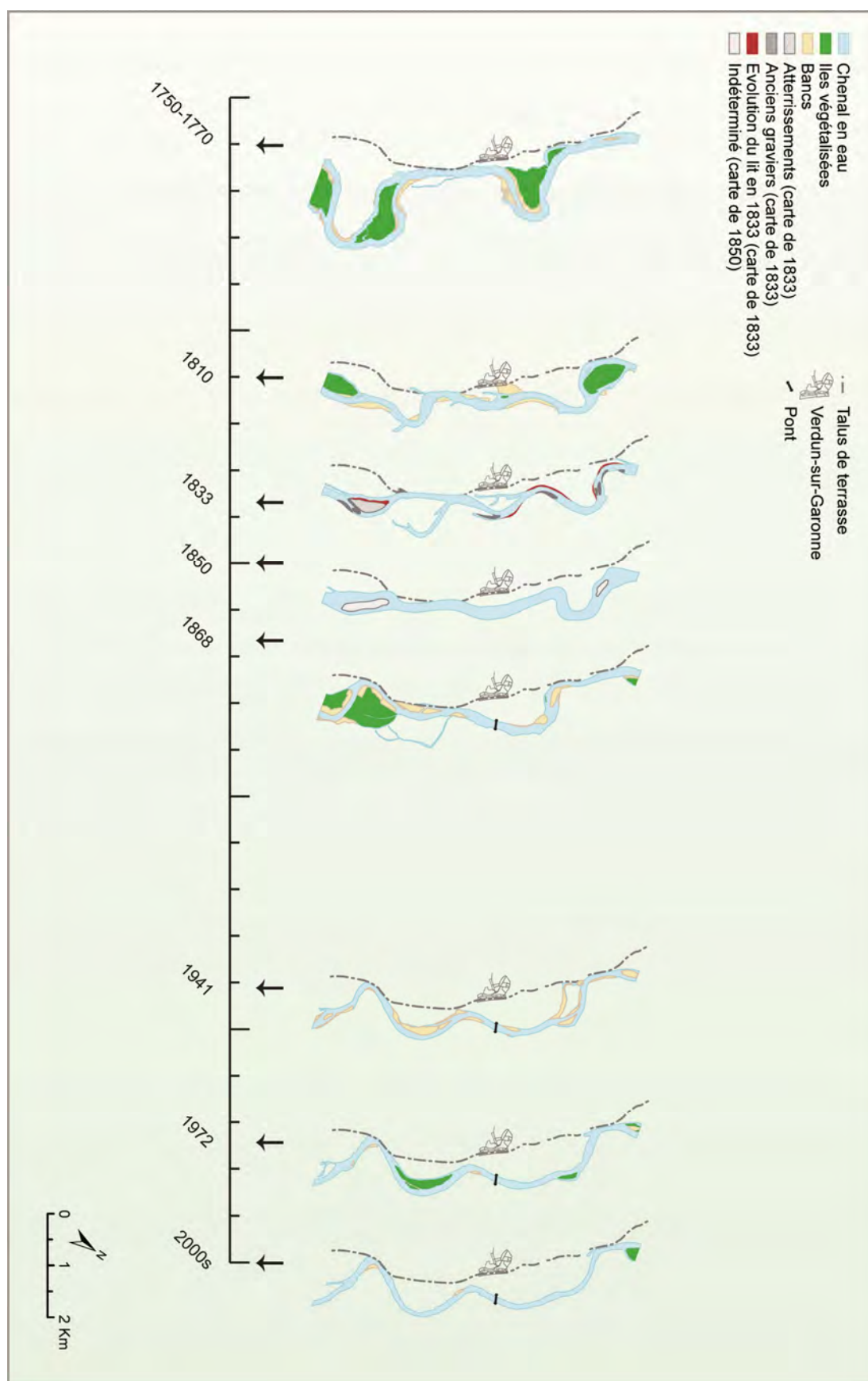


Figure 7.10 : Evolution en plan du chenal dans le secteur de Verdun/Dieupentale, reconstituée à partir des cartes historiques présentées dans le chapitre 4

Le sondage de la grande boucle de méandre située à l'amont du secteur d'étude, visible en eau sur la carte de 1750-1770 (Fig. 7.10) et encore nettement marquée dans le parcellaire (Figs. 7.8 et 7.11), a aussi été planifié mais a finalement été empêché par des difficultés d'accès.



Figure 7.11 : Position des sites d'étude du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale.

7.1.3. Le secteur de Cordes-Tolosannes / St-Porquier

Le secteur de Cordes-Tolosannes/St-Porquier (Fig. 7.12) se situe à 51 km au N-NO de Toulouse et à 14 km au S-SE de la confluence du Tarn. Ce secteur recoupe au total quatre communes du Tarn-et-Garonne : Cordes-Tolosannes (bastide bâtie en 1270), Saint-Porquier (mentionnée dans les textes d'archive depuis les IX^e-X^e siècles), Escatalens (aussi présente dans les textes d'archive depuis les IX^e-X^e siècles) et Castelsarrasin (mentionnée dans les textes d'archive depuis 1156, aujourd'hui sous-préfecture du Tarn-et-Garonne). La première commune est située sur la terrasse rive gauche. Les trois autres sont situées sur la terrasse rive droite et sont traversées depuis la moitié du XIX^e siècle par le canal latéral à la Garonne.

A l'amont de la jonction entre les vallées de la Gimone et de la Garonne, ce secteur se caractérise par une basse plaine large de 2 km et un écoulement le long du talus de terrasse rive gauche (Fig. 7.13). A l'aval, la basse plaine s'élargit pour atteindre une largeur de 3,5 km et le chenal tend progressivement à se centrer au sein de sa plaine. La bassure est relativement étroite, avec une largeur maximale de 1,4 km. Le lit mineur, peu sinueux, présente une largeur réduite (90 à 100 m) pour une profondeur notable (6,5 m - Sauvage, 1999). La pente est ici de 0,0005 m/m (IGN, PROFILS) et les berges sont en grande partie stabilisées.



Figure 7.12 : Photographie aérienne et limites administratives du secteur de Cordes/Saint-Porquier (source : Géoportail). Les points jaunes correspondent aux sites d'étude.

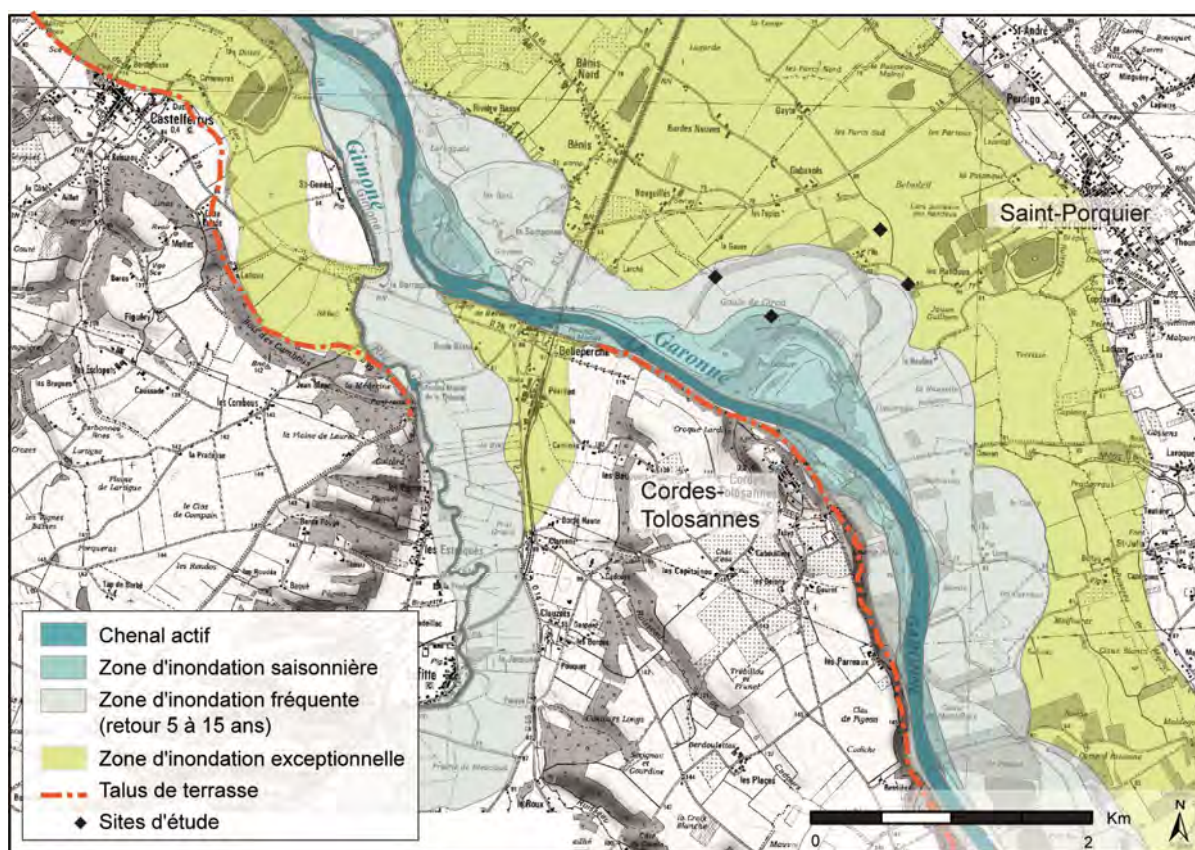
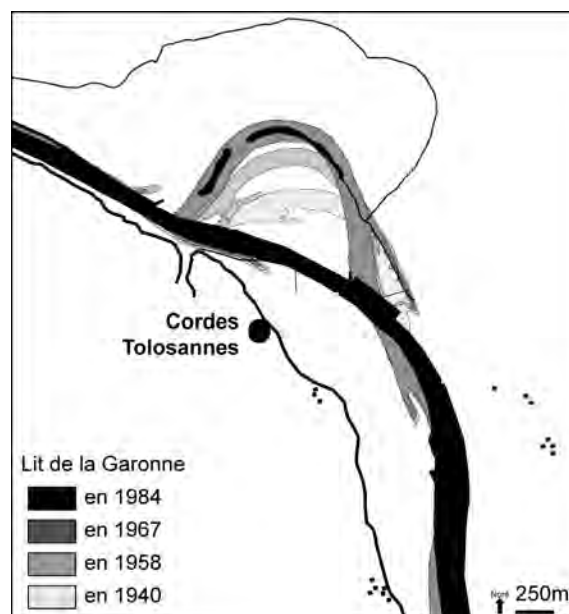


Figure 7.13 : Organisation hydro-géomorphologique du secteur de Cordes/Saint-Porquier (sources : Géoportail et Lambert, 1988).

Le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier présente l'avantage d'avoir fait l'objet d'une étude préliminaire sur l'évolution du lit de la Garonne (Valette et Carozza, 2010 - Fig. 7.14). Les cartes historiques géoréférencées (Fig. 7.15), présentées dans le chapitre 4, viennent compléter les données issues de cette publication en révélant d'abord la présence de deux boucles de méandre de grande amplitude au début du XIX^e siècle (cartes de 1810 et 1833), progressivement déconnectées du chenal principal entre 1833 et 1868. Les cartes montrent dans les deux cas un recouplement par déversement progressif (Lewin 1983 ; Lewis et Lewin, 1983 ; Bravard, 1983 ; Rollet et al., 2005), traduit par la formation de chenaux multiples et l'individualisation temporaire de plusieurs îles végétalisées. Jusqu'au début du XX^e siècle, des îles de forme allongées, séparées de la rive par des chenaux étroits et peu sinueux, sont par ailleurs ponctuellement visibles dans la partie amont du secteur. Après la déconnexion totale du système situé entre Cordes-Tolosannes et Saint-Porquier entre 1868 et les années 1940, le chenal a réamorcé une migration latérale tout en conservant un chenal secondaire au pied du talus de terrasse. Cette évolution, observée dans le détail par Valette et Carozza (2010 - Fig. 7.14), s'est traduite par un ajustement du méandre sur 500 m de distance entre 1940 et 1967, stoppé par la campagne de travaux de 1968 (6^e tranche - Valette, 2002). Le méandre a ainsi été recoupé et isolé par des enrochements, alors qu'un lit artificiel rectiligne a été créé. Des enrochements supplémentaires ont été ajoutés sur la berge rive droite en amont et en aval du chenal artificiel afin de limiter l'érosion des berges (Valette et Carozza, 2010). Plus aucun ajustement du chenal n'a ensuite été observé.

Figure 7.14 : Evolution du lit de la Garonne entre 1940 et 1984 au niveau de Cordes-Tolosannes (modifié d'après Valette et Carozza, 2010).



Les travaux de terrain menés dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier ciblent le système à chenaux multiples visible sur les cartes de 1850 et 1868 (Fig. 7.15). Les anciens chenaux sont encore aujourd'hui nettement visibles sur les photographies aériennes et s'entremêlent avec des paléochenaux plus anciens (Fig. 7.16). Deux objectifs distincts ont donc été définis pour ce secteur : 1) dater les paléochenaux antérieurs à la période renseignée par les cartes pour évaluer leur appartenance au système de méandres de la première moitié du XIX^e siècle et le cas échéant, tenter de comprendre la dynamique de migration du chenal et 2) appréhender la dynamique de comblement des deux chenaux dont la date de déconnexion est connue, afin d'analyser les modes et rythmes de sédimentation.

Quatre paléochenaux ont ainsi été sondés dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier (Fig. 7.16). Leurs identifiants correspondent à l'ordre dans lequel les sondages ont été réalisés et ils sont ici présentés par ordre chronologique de fonctionnement :

- CORD3 : paléochenal antérieur à la période renseignée par les cartes ;
- CORD1 : paléochenal antérieur à la période renseignée par les cartes, dont le tracé chevauche CORD3 ;
- CORD4 : boucle de méandre principale au cours de la première moitié du XIX^e siècle, en cours d'assèchement sur la carte de 1868 (Fig. 7.15) ;
- CORD2 : chenal de recouplement, actif sur la carte de 1850 et en cours d'assèchement sur la carte de 1868 (Fig. 7.15).

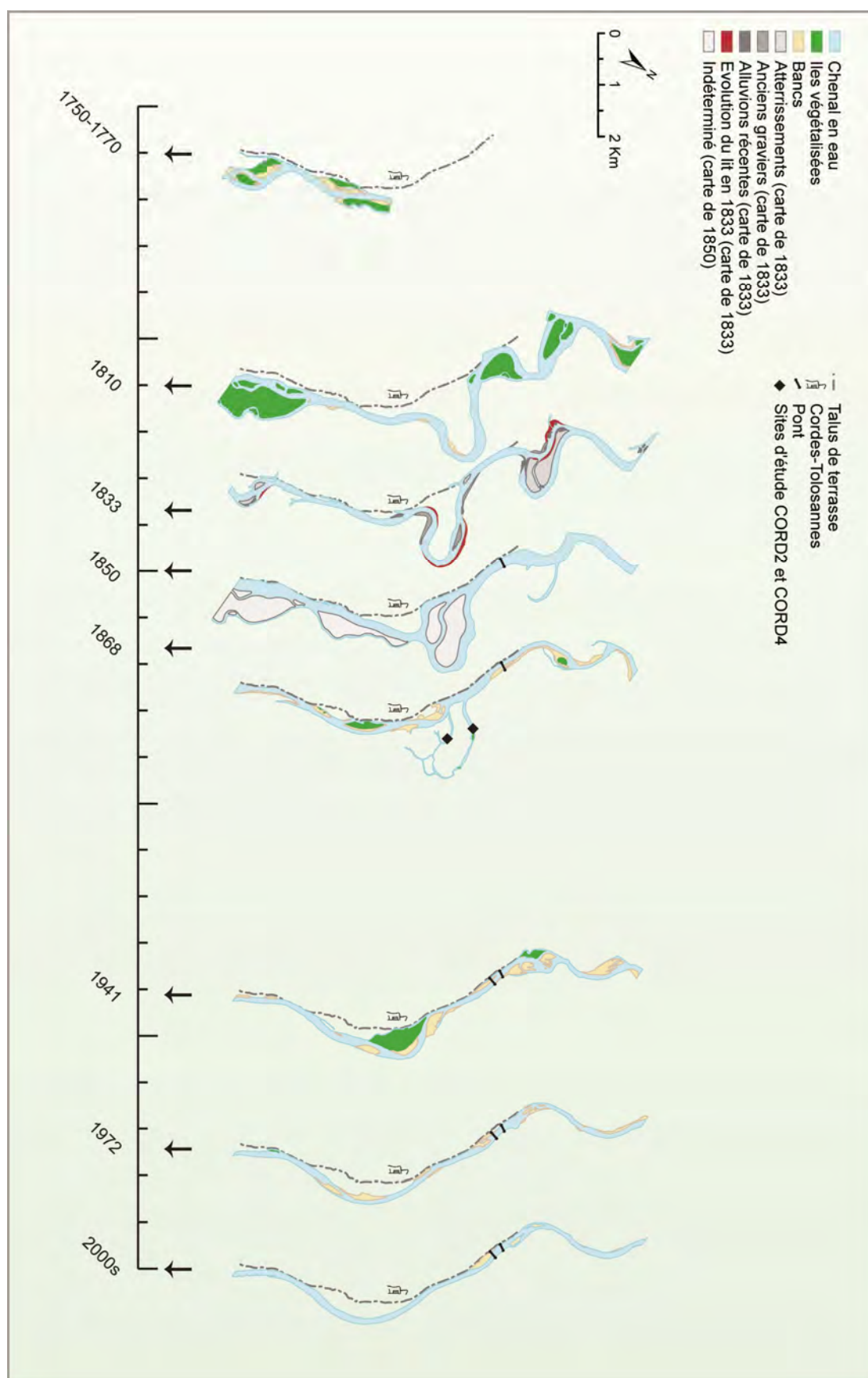


Figure 7.15 : Evolutions en plan du chenal dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier reconstituées à partir des cartes historiques présentées dans le chapitre 4

Les trois sites CORD1, CORD2 et CORD4 correspondent aujourd'hui à des peupleraies. Le site CORD3 est quant à lui cultivé (champs de blé).



Figure 7.16 : Position des sites d'étude du secteur de Cordes-Tolosannes / Saint-Porquier.

7.2. Acquisition et traitement des données de terrain

Sur chacun des sites présentés précédemment, trois types de données ont été récoltées afin de documenter les paléochenaux de la Garonne toulousaine : des données sédimentaires (carottes), des données géophysiques (tomographies de résistivité électriques - TRE) et des données topographiques (profils levés sur le terrain au DGSP ou au théodolite et modèle numérique de terrain - MNT - haute résolution).

7.2.1. Carottages et analyses sédimentaires

Les sondages sédimentaires visent à répondre à un double objectif : 1) définir les bornes des chenaux (fond et berges) et 2) obtenir une image de l'organisation stratigraphique du sous-sol, afin de comprendre le mode de remplissage des chenaux. Dans cette optique, des mesures granulométriques et de teneur en carbone (perte au feu) ont été réalisées sur une série d'échantillons prélevés au sein des carottes. Des datations ^{14}C ont par ailleurs été réalisées sur quelques échantillons organiques.

7.2.1.1. Stratégie et technique de prélèvement des carottes sédimentaires

Les carottages ont préférentiellement été effectués en pointe de méandre afin de cibler les zones les plus profondes. Dans le secteur de Grenade/Ondes, qui est le premier secteur à avoir été sondé, plusieurs carottes ont été prélevées en travers des paléochenaux (Fig. 7.17-A) afin de valider la démarche de croisement des données sédimentaires et géophysiques qui sera explicitée ultérieurement. Dans les autres secteurs, une seule carotte a été prélevée sur chacun des sites (Fig. 7.17-B).

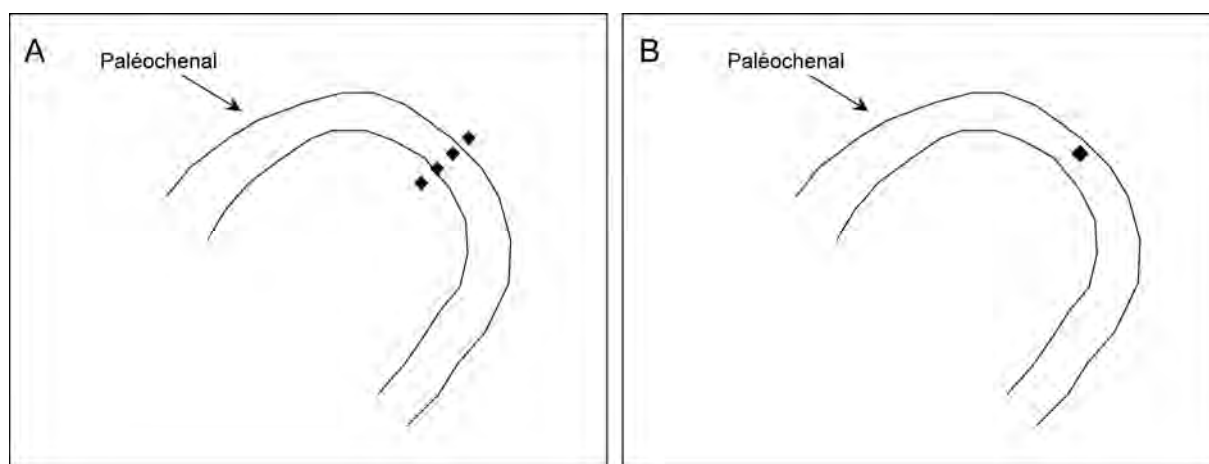


Figure 7.17 : Stratégie de prospection sédimentaire. A - Positionnement des points de carottage sur les sites du secteur de Grenade/Ondes. B - Positionnement des points de carottage sur les sites des secteurs de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale et Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier

Les carottages ont été effectués à l'aide d'un carottier vibro-percuteur type COBRA TT (Fig. 7.18). Cette technique de prélèvement est relativement simple et couramment utilisée en dynamique fluviale : une gouge d'1 m de longueur est positionnée verticalement à la surface du sol et enfoncée à l'aide d'un vibro-percuteur (Fig. 7.18-a) ; une fois totalement enfoncée, elle est extraite à l'aide d'un extracteur à bras de levier (Fig. 7.18-b). De cette manière, les sédiments sont prélevés en préservant l'organisation stratigraphique. L'opération est répétée mètre après mètre en ajoutant des rallonges sur la gouge, jusqu'à ce que le dispositif atteigne une surface trop résistante pour être traversée (généralement une couche de galets). Chaque carotte a pour identifiant le nom du site sur lequel elle a été prélevée, suivi du numéro de prélèvement (e.g., GRE.1, GRE.2, GRE.3, etc.).

Deux types de gouges ont été utilisées pour réaliser cette étude : une gouge fermée permettant de prélever les carottes sédimentaires dans des tubes PVC et de les ramener au laboratoire intactes (Fig. 7.18-c) et une gouge ouverte, impliquant que les logs soient levés et les carottes sous-échantillonnées sur le terrain (Fig. 7.18-d). Chacune de ces deux techniques présente des avantages et des limites, qui justifient qu'elles aient été couplées. La gouge fermée permet la réalisation de certaines analyses stratigraphiques qui nécessitent que la carotte soit conservée intacte (e.g., spectro-colorimétrie ou susceptibilité magnétique). Cependant, le tube a tendance à se bloquer dans la gouge lorsque les niveaux sableux sont atteints. La gouge ouverte est souvent plus efficace dans les niveaux sableux et ne nécessite pas de temps d'ouverture en laboratoire. Toutefois, cette technique oblige la levée des logs et la prise de photographies sur le terrain, ce qui représente une perte d'information. De plus, en cas de milieu saturé, il arrive que les sables fluent et soient ainsi perdus.



Figure 7.18 : Photographies montrant les techniques et outils utilisés pour le prélèvement des carottes et échantillons sédimentaires. a) Enfoncement de la gouge au vibro-percuteur ; b) Extraction de la gouge à l'extracteur à bras de levier ; c) Evacuation et référencement d'une carotte tubée (prélèvement à la gouge fermée) ; d) Sous-échantillonnage sur site d'une carotte non tubée (prélèvement à la gouge ouverte)

7.2.1.2. Représentation graphique des carottes sédimentaires (log)

Pour chaque carotte prélevée, un log préliminaire a été levé à partir d'observations à l'œil nu (sur le terrain pour les prélèvements à la gouge ouverte ; après ouverture en laboratoire pour les prélèvements en tube). Le format de log choisis correspond à un tableau à plusieurs entrées, inspiré de formats couramment utilisés dans la littérature (Fig. 7.19 - Tucker, 1996 ; Nichols, 2013). Les critères utilisés sont détaillés ci-dessous :

- La première colonne du tableau représente l'échelle verticale pour situer la profondeur et l'épaisseur des niveaux sédimentaires.
- Les lithofaciès sont représentés dans une deuxième colonne. La gamme granulométrique (argile, limon, sable, gravier, galet) est indiquée par un figuré classique (rayures, points et ronds) et précisée en jouant avec la largeur des niveaux sur une échelle logarithmique (très fin, fin, moyen, grossier, très grossier). Pour chaque niveau, la seconde phase peut en plus être précisée (limon sableux, sable limoneux, sable graveleux, etc.). Les limites entre les niveaux sont codées

selon si elles sont progressives (tirets) ou nettes (ligne pleine) et horizontales ou obliques. Les fragments ligneux ou charbons prélevés susceptibles de représenter un élément de datation (analyses ^{14}C) sont annotés sur les lithofaciès.

- Les éléments de structure sont indiqués dans une troisième colonne. Les niveaux dits massifs sont ceux dont l'épaisseur est supérieure à 3 cm et qui ne présentent aucune stratification visible à l'œil nu, les niveaux stratifiés sont ceux qui présentent des lamines d'épaisseur inférieure à 3 cm, plus ou moins nettement dessinées. Cette stratification peut être horizontale ou oblique. Les indicateurs d'une transformation post-dépôt possible ou avérée sont aussi annotés dans cette colonne (nodules, concrétions carbonatées, signes de bioturbation, racines, aspect tacheté, etc.).
- Une première interprétation du type de processus à l'origine des dépôts (décantation, débordement, etc.) et de l'environnement de dépôt correspondant (plaine alluviale, chenal, etc.) est proposée dans les deux dernières colonnes.

Les logs préliminaires ont tous été numérisés et révisés/affinés grâce à des analyses sédimentaires complémentaires (granulométrie laser et perte au feu, cf. 2.1.3).

[illegible]

Figure 7.19 : Exemple de fiche pour le dressage d'un log et légende associée (modifié d'après Nichols, 2013)

7.2.1.3. Protocoles analytiques et traitement des données sédimentaires en laboratoire : granulométrie laser, perte au feu et datations ^{14}C

Pour chacun des sites sondés, une carotte a fait l'objet d'analyses sédimentaires complémentaires. A partir de l'observation des logs, un échantillon a été prélevé dans chaque niveau/lithofaciès dont l'épaisseur le permettait (sur le terrain pour les prélèvements à la gouge ouverte ; après ouverture en laboratoire pour les prélèvements en tube). Chaque échantillon a ensuite été subdivisé en deux sous-échantillons, afin de mener une analyse granulométrique d'une part (2 cm^3) et une analyse des teneurs en carbone d'autre part (2 cm^3). Les échantillons organiques potentiellement datables (macrorestes et charbons) ont aussi été prélevés. Ceux susceptibles d'être intéressants au vu du niveau dans lequel ils ont été trouvés ont été envoyés pour datation radiocarbone aux laboratoires de Poznan ou de Miami (Beta Analytic). Lorsque cela était possible, ces échantillons ont auparavant fait l'objet d'une détermination (V. Py, GEODE).

Plusieurs protocoles de préparation des échantillons destinés à l'analyse granulométrique (proposés dans la littérature ou par différents laboratoires) ont été testés sur un lot d'échantillons. Le protocole le plus commun a au final été retenu. Les échantillons ont ainsi été tamisés à 2 mm, puis traités à l'eau oxygénée (75 ml d'eau distillée pour 5 ml de peroxyde d'hydrogène à 30%) à froid pendant 3 heures, puis à 70° jusqu'à réduction de l'ébullition (Fig. 7.20-a). La température a ensuite été maintenue à 40° jusqu'à évaporation de la phase liquide. Les échantillons secs ont été mis en pommade par ajout de quelques gouttes d'hexamétaphosphate de sodium, afin de disperser les grains, notamment les argiles. Les échantillons ainsi préparés ont été mesurés au granulomètre laser Horiba 950 (Fig. 7.20-b). Pour chaque échantillon, plusieurs prélèvements ont été passés au granulomètre et pour chaque prélèvement, plusieurs mesures ont été réalisées. Les résultats de l'analyse granulométrique (proportion volumique de chaque gamme granulométrique) ont été moyennés pour chaque échantillon, puis traités à l'aide de la fiche de calcul GRADISTAT (Blott et Pye, 2001). Les textures obtenues ont servi à vérifier/corriger les logs préliminaires et différents indices ont été retenus pour l'interprétation des résultats : les diamètres D 0,5 et D 0,99 ; le type granulométrique (modifié d'après Udden, 1914 et Wentworth, 1922) et l'indice de tri calculé selon la méthode géométrique des moments (Krumbein et Pettijohn, 1938).

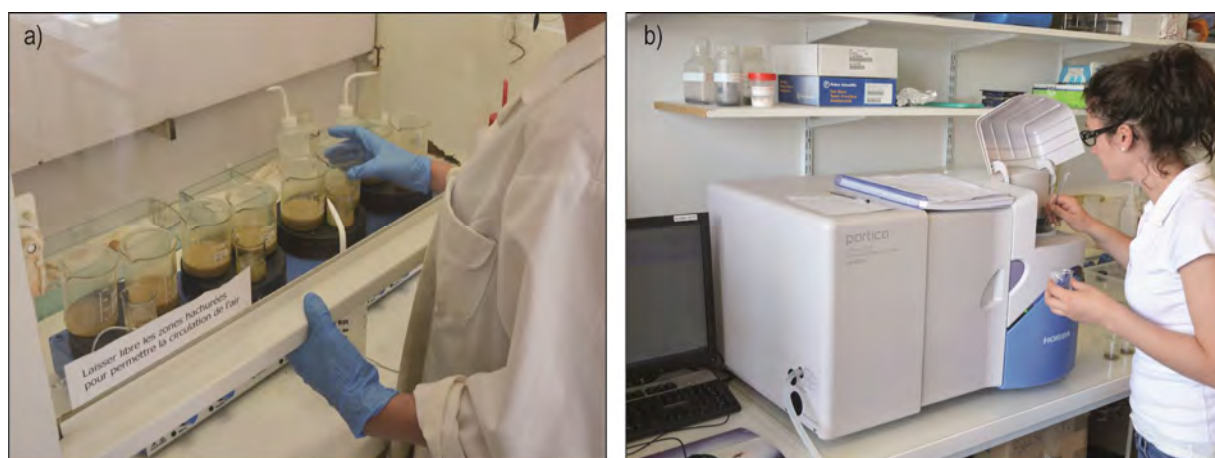


Figure 7.20 : Photographies montrant la préparation et l'analyse granulométrique des échantillons sédimentaires. a) Élimination de la matière organique à l'eau oxygénée ; b) Mesure granulométrique à l'aide du granulomètre laser Horiba 950

Les teneurs en carbone ont été mesurées par perte au feu en suivant le protocole proposé par Dean (1974) et modifié par Heiri et al. (2001). Les échantillons ont été pesés, puis séchés 24 h à l'étuve (105°) et pesés une nouvelle fois. La valeur obtenue permet d'estimer la teneur en eau. Les échantillons ont ensuite été cuits pendant 4 h à 550° au four à moufle (Fig. 7.21) et pesés une nouvelle fois après refroidissement. La valeur obtenue permet d'estimer la teneur en carbone organique. Les mêmes échantillons ont enfin été cuits à 950° pendant 2 h et pesés une dernière fois après refroidissement. La valeur obtenue permet d'établir la teneur en carbonate.

Figure 7.21 : Refroidissement des creusets contenant les échantillons de sédiments après 4 h de cuisson à 550° dans le four à moufle.



Des mesures de susceptibilité magnétique et de spectro-colorimétrie ont par ailleurs été testées sur les premières carottes tubées, afin d'affiner le repérage des niveaux stratigraphiques et de compléter leur description. Toutefois, les résultats n'ont pas été jugés concluants, notamment en raison de la forte proportion de niveaux bioturbés dans les carottes. De plus, l'impossibilité de prélever les carottes en tube sur les sites les plus sableux n'a pas permis de systématiser ces mesures. Ce type de données n'a donc pas été retenu.

7.2.1.4. Synthèse des données issues de l'analyse granulométrique et de la perte au feu

Pour éviter la multiplication des données descriptives issues de l'analyse des échantillons sédimentaires (taille de grain médiane, teneur en argile, teneur en limon, teneur en sable, indice de tri, teneur en carbone organique, teneur en carbonate, etc.) nous avons pris le parti de synthétiser les données en réalisant une typologie des échantillons. La démarche méthodologique mise en %uvre s'organise en deux temps : 1) la classification des échantillons à partir de leur distribution granulométrique et 2) la caractérisation des classes obtenues par l'intégration d'indices complémentaires issus de la fiche de calcul GRADISTAT (Blott et Pye, 2001 - le diamètre médian des grains, *i.e.*, D_{0,5} ; le type granulométrique et l'indice de tri) et des mesures de perte au feu (la teneur en carbone organique et la teneur en carbonate).

Une démarche statistique semblable à celle présentée en Partie 2 a d'abord été mise en %uvre. Elle s'appuie sur des essais similaires développés par Soudart et Mahé (1975) en milieu tropical, Guillou et al. (2000) en milieu marin et Salomon (2013) en milieu deltaïque. Une analyse en composante principale (ACP) a été réalisée sur les 133 échantillons analysés, renseignés par 11 indicateurs de distribution granulométrique (proportion des gammes granulométriques allant de l'argile au sable très grossier). Les liens de corrélation entre les différentes tailles de grain ont ainsi été identifiés. Les scores des individus sur chacun des axes factoriels de l'ACP (11) ont ensuite été post-traités par classification ascendante hiérarchique (CAH) afin de définir des groupes d'échantillons aux caractéristiques communes.

Les résultats de l'ACP mettent en évidence trois groupes, qui suivent une logique évidente de taille, sans qu'aucune mixité ne soit mise en évidence. Cette méthode s'avère

donc robuste pour discriminer des ensembles sédimentaires. Les deux premiers axes de l'ACP représentent 78,40% de la variance totale (Fig. 7.22-A). L'axe F1 est corrélé aux sédiments fins (de l'argile au limon moyen) et est anti-corrélé aux sables fins et moyens. Toutes ces variables contribuent de manière à peu près équivalente à l'axe F1 (13% chacune en moyenne). L'axe F2 est corrélé à une taille de grains intermédiaire, allant du limon grossier au sable très fin, et est anti-corrélé aux grains les plus grossiers (sables grossiers et très grossiers). Deux variables contribuent fortement à cet axe : les limons très grossiers (29%) et sables très fins (22%).

Conformément au dendrogramme issu de la CAH (Fig. 7.22-B), une classification en trois classes a été retenue. La projection de ces classes sur les deux premiers axes factoriels de l'ACP (Fig. 7.22-C) montre que le premier groupe d'échantillons (classe 1 - 64 échantillons) est associé aux valeurs positives de l'axe F1. Ce groupe rassemble donc les échantillons caractérisés par les tailles de grains les plus fines. Le deuxième groupe (classe 2 - 55 échantillons) est principalement associé aux valeurs positives de l'axe F2. Il rassemble donc les échantillons caractérisés par des granulométries intermédiaires. Le troisième groupe (classe 3 - 14 échantillons) est enfin associé aux valeurs négatives des deux axes F1 et F2 et correspond donc aux échantillons les plus sableux.

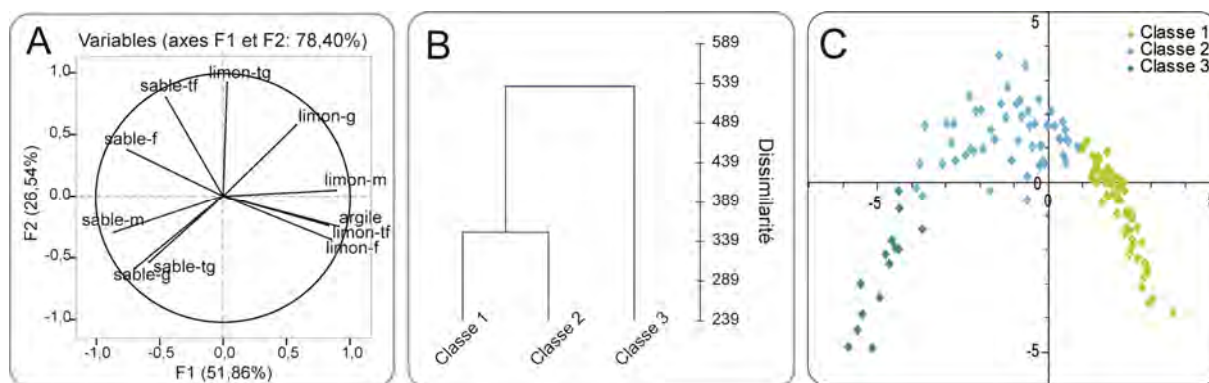


Figure 7.22 : Résultats du traitement des données granulométriques par ACP/CAH. A - Cercle des corrélations montrant les liens existants entre les différentes variables granulométriques (ACP). B - Dendrogramme montrant le regroupement des échantillons en trois classes distinctes (CAH). C - Projection des points de chacune des classes sur les axes factoriels (ACP/CAH).

L'analyse des indices granulométriques (Fig. 7.23) permet une description plus détaillée de chacun des trois groupes :

- Les échantillons de la classe 1 sont en grande partie qualifiés par GRADISTAT de fine (*mud* - 82%) et plus ponctuellement de fines sableuses (*sandy mud* - 18% - Fig. 7.23-A). La taille médiane des grains s'étend de 3 à 12 μm (Fig. 7.23-B), ce qui correspond à une gamme granulométrique allant de l'argile au limon fin.
- La classe 2 rassemble des échantillons de type sablo-limoneux (*sandy mud* - 67%) ou limono-sableux (*muddy sand* - 29%), ponctuellement légèrement graveleux (*slightly gravelly sandy mud* - 4% ; Fig. 7.23-A). La taille médiane des grains est comprise entre 11 et 193 μm (Fig. 7.23-B), ce qui correspond à une gamme granulométrique allant du limon fin au sable très fin.
- La classe 3 correspond à des échantillons purement sableux (*sand* - 50%) ou limono-sableux (*muddy sand* - 29%) ou encore légèrement graveleux (*slightly gravelly sand* - 21% - Fig. 7.23-A). La taille médiane des grains est comprise entre 237 et 536 μm (Fig. 7.23-B), ce qui correspond à des sables fins à grossiers.

Les trois classes présentent un indice de tri globalement élevé (Fig. 7.23-C), avec des valeurs principalement comprises entre 2 et 6, qui traduisent des échantillons peu à très peu

triés. Au sein de cette tendance, la classe 2 rassemble les échantillons les moins bien triés, tandis que la classe 3 rassemble les échantillons les mieux triés.

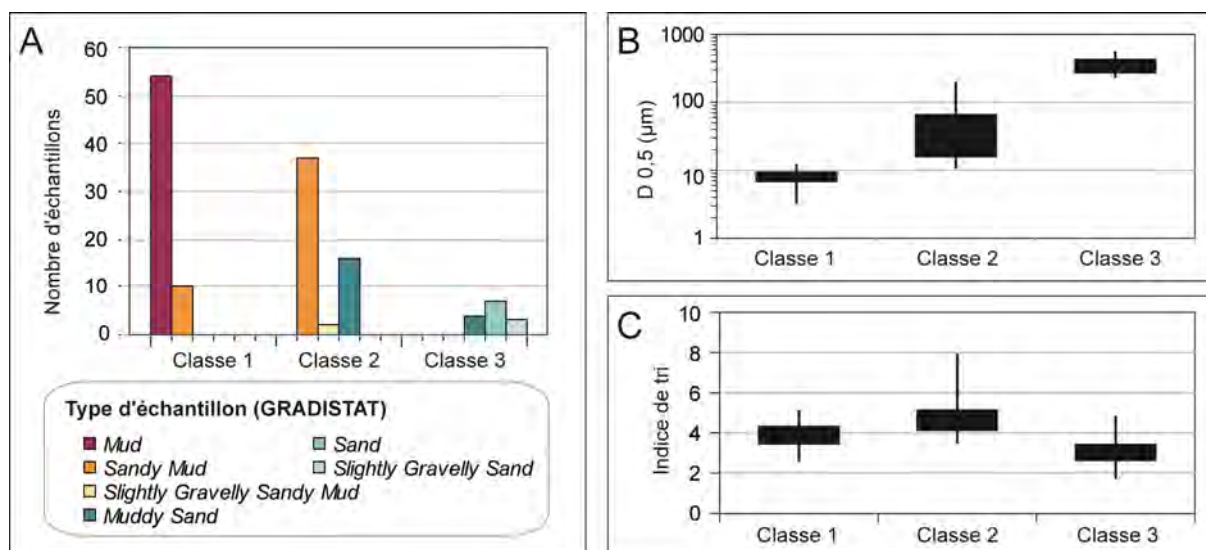


Figure 7.23 : Indices granulométriques pour chaque classe issue de l'ACP/CAH. A - Types d'échantillons (GRADISTAT). B - Diamètre médian des échantillons. C - Indice de tri (plus l'indice est fort, moins l'échantillon est trié).

L'analyse des teneurs en carbone organique et en carbonates (Fig. 7.24) révèle une plus grande concentration en carbone dans les échantillons de la classe 1 (Fig. 7.24-A), avec en moyenne 4,05% de matière organique et 5,28% de carbonates (Fig. 7.24-B). La classe 2 présente des teneurs moyennes en carbonate légèrement supérieures (5,81%) mais des teneurs moyennes en carbone organique nettement plus faibles (2,29% - Fig. 7.24-B). Les classes 1 et 2 comptent trois échantillons marginaux, qui présentent des teneurs en carbonate particulièrement élevées, *i.e.*, supérieures à 50% (Fig. 7.24-A) : CORD1 272-273 (classe 1), JUL1 216-219 (classe 2) et CORD2 128-129 (classe 2). La classe 3 est caractérisée par les teneurs en carbone organique et en carbonate les plus faibles (respectivement <1,5 et 3% - Fig. 7.24-B).

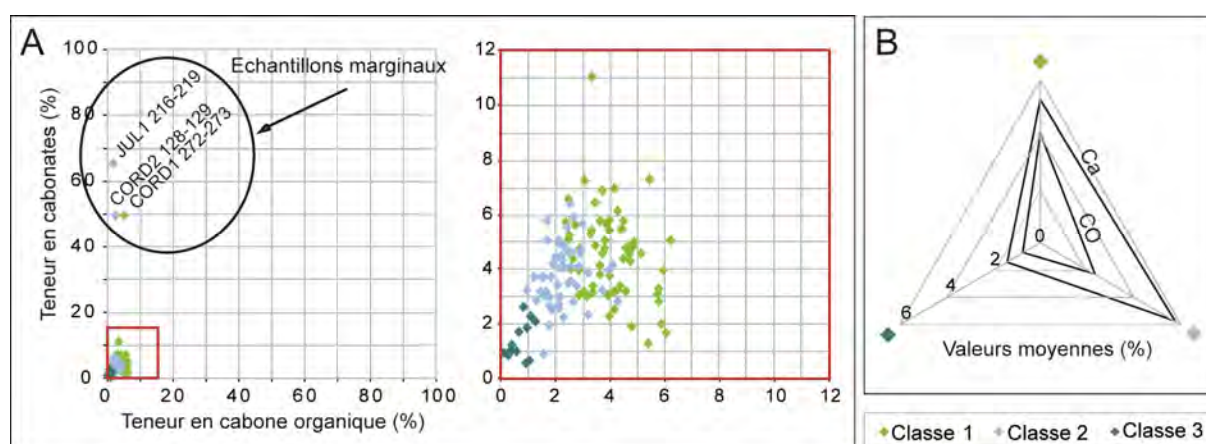


Figure 7.24 : Résultats de l'analyse des teneurs en carbone. A - Nuage de points représentant les teneurs brutes pour chaque classe. B - Teneurs moyennes pour chaque classe.

Trois types de sédiments pourront donc être observés lors de l'analyse des logs :

- 1) des sédiments fins (argile à limon fin), relativement chargés en matière organique et en carbonate ;
- 2) des sédiments de taille intermédiaire (sablo-limoneux à limono-sableux), moins chargés en carbone organique ;
- 3) des sédiments sableux (sables fins à grossiers, parfois limoneux ou légèrement graveleux) caractérisés par des teneurs très faibles en carbone organique et en carbonate.

7.2.2. Tomographies de résistivité électrique (TRE)

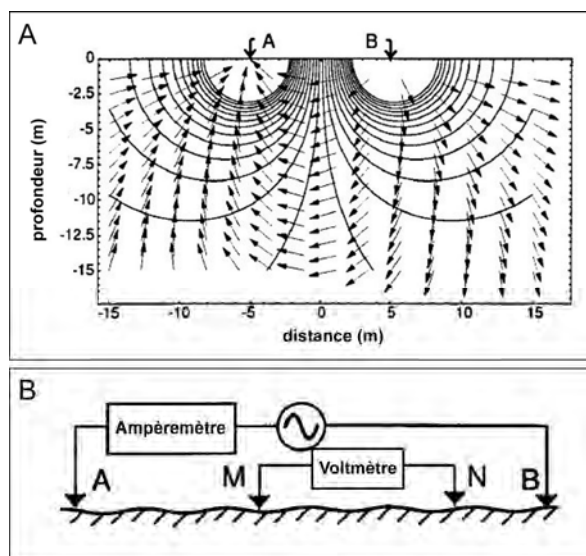
Les prospections géophysiques réalisées (tomographies de résistivité électrique - TRE), visent à obtenir une image 2D du sous-sol, afin d'appréhender la géométrie des paléochenaux.

7.2.2.1. Principe des mesures de résistivité électrique

La résistivité électrique d'un matériau est une mesure de sa capacité à empêcher un courant électrique de passer (Herman, 2001). Mesurer la résistivité électrique du sous-sol (Loke, 2011 ; Binlay et al., 2015) permet d'identifier des corps sédimentaires distincts, dont les valeurs de résistivité dépendent principalement de la teneur en eau (*i.e.*, de la granulométrie, loi d'Archi) et en argile. En contexte de plaine alluviale, ce type de mesure peut permettre d'individualiser le fond, les berges et le remplissage sédimentaire d'anciens chenaux (*e.g.*, Laigre et al., 2012 ; Hausmann et al., 2013).

Mesurer la résistivité électrique du sous-sol consiste à injecter un courant électrique d'intensité connue entre deux *électrodes d'injection* A et B positionnées à la surface du sol (Fig. 7.25-A) et à mesurer simultanément la différence de potentiel électrique entre deux *électrodes de mesure* M et N (Fig. 7.25-B). Cette différence de potentiel est alors interprétée en termes de résistivité des corps traversés, par l'application de la loi d'Ohm. Plus l'écartement entre les électrodes est important, plus la mesure est profonde.

Figure 7.25 : Principe des mesures de résistivité électrique (modifié d'après Herman, 2001). A - Lignes de courant électrique (flèches) et surfaces équipotentielles (lignes plines, caractérisées par un même potentiel électrique) entre les deux électrodes d'injection A et B au sein d'un milieu homogène. B - Configuration courante des quatre électrodes : le courant est généré entre les électrodes A et B ; la tension est mesurée entre les électrodes M et N.



Dans un premier temps, les sections 2D obtenues correspondent à des valeurs de *résistivité apparente*. On entend par là que les mesures sont effectuées en considérant un milieu homogène. Pour prendre en compte l'hétérogénéité du milieu, un processus mathématique dit *d'inversion* doit être appliqué à *posteriori*.

7.2.2.2. Stratégie et technique d'acquisition des TRE

Sur chacun des paléochenaux étudiés, une section transversale passant par le(s) point(s) de carottage a été tracée, le long de laquelle une TRE a été levée (Fig. 7.26).

Les TRE ont été acquises à l'aide d'un TerraMeter ABEM SAS 1000 (Fig. 7.27) en utilisant systématiquement le protocole de mesure Schlumberger. Afin d'obtenir une bonne résolution spatiale et une profondeur suffisante, un écartement d'1 m entre les électrodes a généralement été retenu. Toutefois, pour certains paléochenaux particulièrement larges, un écartement plus important a été préféré (1,5 ou 2 m) afin de réduire le temps de prospection. L'inversion des données a été réalisée *a posteriori* en tenant compte de la topographie de surface, à l'aide du logiciel Res2Dinv (Loke, 2011).

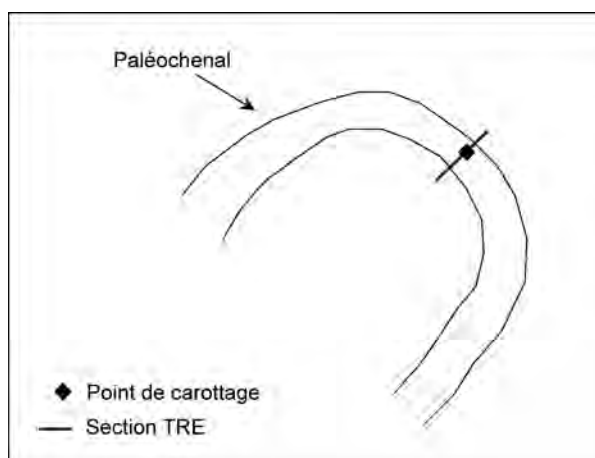


Figure 7.26 : Stratégie de prospection géophysique.



Figure 7.27 : Photographies du matériel utilisé pour les mesures de résistivité électrique. a) Dispositif TerraMeter ABEM SAS 1000 ; b) Electrodes positionnées à la surface du sol et reliées entre elles par un câble électrique.

7.2.3. Profils topographiques et modèles numériques de terrain (MNT)

Deux types de données topographiques ont permis de compléter les données sédimentaires et géophysiques présentées précédemment : 1) des profils levés sur le terrain au GPS différentiel (DGPS) ou au théodolite et 2) un MNT haute résolution.

7.2.3.1. Les profils levés sur le terrain (GPS différentiel - DGPS - et théodolite)

Les prospections électriques ont nécessité en parallèle la levée de profils topographiques, nécessaires au calage altimétrique des mesures. Pour chaque section, les

positions x , y et z des électrodes ont donc été enregistrées au DGPS (Fig. 7.28-a) et retranscrites sous forme de courbe distance/altitude sous Excel®. Dans le cas des sites CORD1 et CORD2, la présence d'arbres n'a pas permis d'obtenir un bon signal GPS. Les mesures ont donc été réalisées au théodolite (Fig. 7.28-b).



Figure 7.28 : Photographies des sessions de mesures topographiques. a) Mesures au DGPS ; b) Mesures au théodolite.

7.2.3.2. Le MNT haute résolution

Au terme des travaux de terrain, le laboratoire GEODE a fait l'acquisition d'un modèle numérique de terrain (MNT) réalisé par LIDAR aéroporté, qui couvre la vallée de la Garonne à une résolution de 1 m (IGN). Ce MNT haute résolution a permis d'approfondir l'analyse de l'organisation topographique de la plaine pour chacun des secteurs d'étude, ainsi que la réalisation de profils topographiques complémentaires sous SIG.

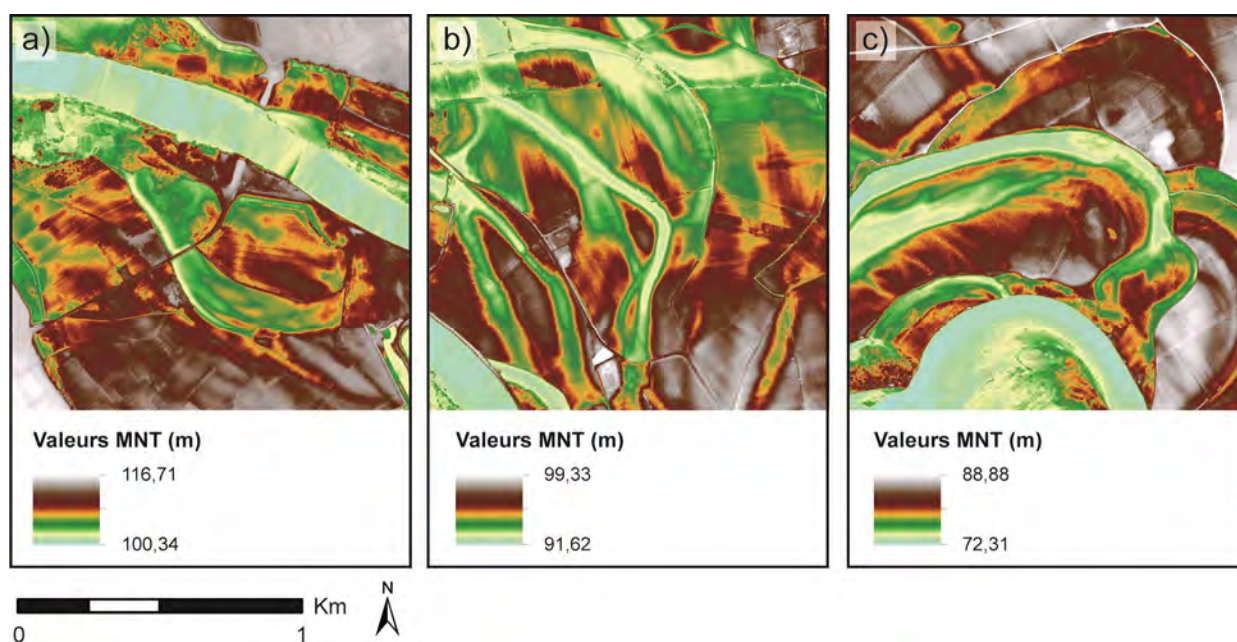


Figure 7.29 : Modèle numérique de terrain haute résolution (1 m - Source : IGN). a) Secteur de Grenade/Ondes ; b) Secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale ; c) Secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier.

7.3. Interprétation des données de terrain

Deux éléments majeurs issus des données de terrain peuvent être interprétés en termes de fonctionnement hydro-sédimentaire des chenaux (paléohydraulique) et évolution des bras post-déconnexion : 1) la géométrie des corps sédimentaires et 2) l'organisation stratigraphique du remplissage sédimentaire.

7.3.1. Interprétation de la géométrie des corps sédimentaires

La géométrie des corps sédimentaires observés en sous-sol permet d'une part de tirer des conclusions sur la capacité hydraulique des paléochenaux (paléohydraulique) et d'autre part d'évaluer le stade de comblement et les vitesses de sédimentation des différentes formes.

7.3.1.1. Capacité hydraulique (paléohydraulique)

Le croisement des données topographiques, géophysiques et sédimentaires permet de vérifier la présence de paléochenaux aux points de sondage et le cas échéant, d'en délimiter les principales unités géométriques. Pour cela, deux éléments doivent être identifiés (Fig. 7.30) : 1) la largeur à plein bord, qui peut généralement être déterminée grâce à l'analyse de la topographie de surface et 2) le fond de la forme, positionné au niveau résistant contre lequel butte le carottage (charge de fond du chenal) et/ou extrapolé à partir des valeurs de résistivité électrique.

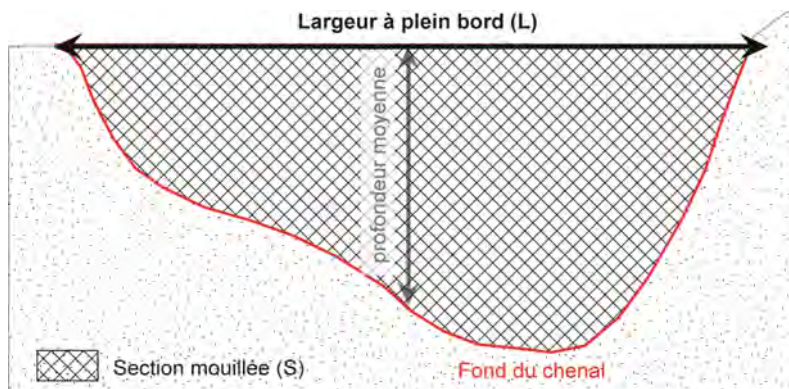


Figure 7.30 : Eléments de géométrie hydraulique qui caractérisent un paléochenal.

Ces deux limites permettent de définir le contour de la section mouillée à plein bord (Fig. 7.30), qui peut ensuite être interprétée en utilisant des formules de géométrie hydraulique : 1) la formule de Manning (Eq 7.1) permet d'estimer un débit à plein bord et 2) ce débit, associé à la pente du chenal et à sa largeur à plein bord, permet de calculer la puissance spécifique du chenal (Eq 7.2). Les valeurs de pente utilisées pour ces calculs sont issues des profils longitudinaux relevés et dressés par le Service du Nivellement Général de la France (IGN, PROFILS), mis à jour pour la dernière fois en 1987. La largeur à plein bord est quant à elle mesurée à partir du MNT.

Débit à plein bord (Q , $m^3.s$)

$$Q = K.S.R^{2/3}i^{1/2}$$

Eq 7.1

$$\text{Puissance spécifique (, W/m}^2\text{)} = .Q.i/L \quad \text{Eq 7.2}$$

Avec :

| | |
|-----|---|
| K | coefficient de rugosité du lit (coefficient de Strickler pour les rivières de plaine à végétation moyennement dense : 35) ; |
| S | aire de la section mouillée à plein bord (m ²) ; |
| P | périmètre de la section mouillée à plein bord |
| R | rayon hydraulique ($R = S/P$, m) ; |
| i | pente du tronçon de cours d'eau (m/m) ; |
| | poids volumique de l'eau (9810 N/m ³) |
| L | largeur à plein bord (m). |

Ces valeurs serviront à réaliser une étude comparative des paléochenaux de la plaine de la Garonne entre eux mais doivent être utilisées avec précaution pour plusieurs raisons : 1) la limite du fond du chenal n'est pas toujours facile à identifier (Hausmann et al., 2013), ce qui conduit parfois à une reconstitution approximative de la section mouillée à plein bord (Baker et al., 2002) ; 2) les calculs s'appuient sur des valeurs de pente qui ont changé entre la période de fonctionnement du paléochenal sondé et l'actuel et 3) la formule de Manning s'applique en toute rigueur à des écoulements uniformes et doit donc être calculée sur des sections rectilignes, or ici les sites d'étude sont positionnés en pointe de méandre. Cependant, l'application d'autres méthodes adaptées aux méandres (Rotnicki, 1991) nécessite de disposer de la valeur médiane de la charge de fond, ce qui n'est pas le cas ici.

7.3.1.2. Stade de comblement et vitesse de sédimentation

Le stade de comblement des paléoformes sondées correspond au ratio entre l'aire de la section mouillée à plein bord et l'aire de la section mouillée comblée par le remplissage sédimentaire (Eq 7.3 - Fig. 7.31).

Les formes pour lesquelles la date de déconnexion du chenal a pu être estimée (à partir des cartes historiques ou datations ¹⁴C) ont fait l'objet d'un calcul de la vitesse de sédimentation (Eq 7.4). Le calcul a été réalisé sur deux valeurs d'épaisseur de remplissage distinctes selon la nature de l'élément de datation : 1) l'épaisseur moyenne de la zone de remplissage délimitée sur les TRE (Fig. 7.31) dans le cas des chenaux renseignés par les cartes historiques et 2) l'épaisseur au dessus du niveau de prélèvement du macro-reste végétal en cas de datation ¹⁴C.

$$\text{Stade de comblement (SC, \%)} \quad SC = Sr/S*100 \quad \text{Eq 7.3}$$

$$\text{Vitesse de sédimentation (VS, cm/an)} \quad VS = Er/(t_1-t_0) \quad \text{Eq 7.4}$$

Avec :

| | |
|------|--|
| S | aire de la section mouillée à plein bord (m ²) ; |
| Sr | aire de la section mouillée comblée par le remplissage (m ²) ; |
| Er | épaisseur du remplissage (cm) ; |

- t_1 date du sondage ;
 t_0 date estimée de la déconnexion du bras ;

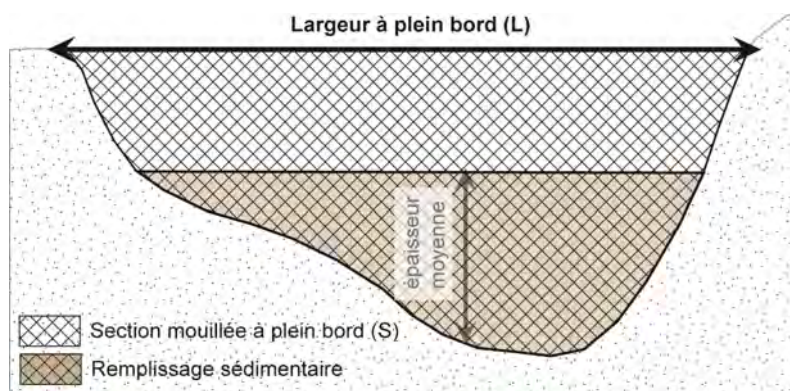


Figure 7.31 : Éléments pris en compte dans la définition du stade de comblement et de la vitesse de sédimentation.

7.3.2. Interprétation des données sédimentaires

Les données issues des analyses sédimentaires (logs, granulométrie, teneur en carbone, etc.) permettent de tirer des conclusions sur les environnements de dépôt et sur les processus à l'origine du dépôt.

7.3.2.1. Caractérisation de l'environnement de dépôt (faciès de Miall, 1996)

La reconnaissance de faciès sédimentaires permet d'appréhender l'environnement de dépôt d'un sédiment. Cette démarche consiste à caractériser les unités de dépôt, dont la nature et l'organisation dépendent de l'évènement à l'origine de sa formation. Dans ce travail, nous nous sommes appuyés sur le référentiel proposé par Miall (1996). Six des faciès de ce référentiel ont été reconnus sur les logs de la plaine de la Garonne toulousaine (Fig. 7.32). Parmi ceux-ci, trois sont des faciès à granulométrie fine (F : argile, limon et sable très fin), deux sont des faciès sableux (S) et le dernier est un faciès graveleux (G) :

- Le faciès Fr peut être sableux, limoneux ou argileux. Il se caractérise par la présence de racines et les signes d'une bioturbation (aspect tacheté, présence de galeries, etc.). Ce faciès traduit le développement d'un sol et se forme généralement en contexte de plaine alluviale. Associé à des processus post-dépositionnels, l'enregistrement du mode de dépôt initial peut aussi avoir été effacé. Ce faciès peut notamment présenter une stratification primaire, obscurcie ou détruite par les racines, la bioturbation ou les processus liés à la nappe.
- Le faciès Fm se caractérise par une lithologie fine (argile ou limon) et une structure massive. Ce faciès est caractéristique d'un dépôt dans des zones d'eau stagnante. Il est souvent attribué à un contexte de tressage mais il a aussi été étendu aux zones de plaine alluviale les plus distantes du lit actif, incluant les bras morts (Rust, 1978).
- Le faciès Fl peut être sableux, limoneux ou argileux. Il se caractérise par une fine stratification, avec des lamines de quelques millimètres à quelques centimètres

d'épaisseur. Ce faciès correspond à des dépôts de suspension et de courant à faible force tractrice. Il peut être interprété de plusieurs manières : dépôts de débordement, dépôts de bras mort, ou dépôts de fin de crue.

- Le faciès Sm correspond à des sables fins à grossiers et se caractérise par une structure massive. Ce type de faciès peut correspondre à un dépôt par gravité lors d'un épisode de crue rapide et se retrouve aussi souvent dans des petits chenaux de rupture de berge. Toutefois, la texture massive peut aussi être produite par des modifications post-dépôt, comme par exemple la déshydratation ou la bioturbation. Des structures sédimentaires résiduelles floues peuvent alors révéler ce genre d'origine.
- Le faciès Sh correspond à des sables très fins à grossiers, caractérisés par une stratification horizontale. Ce lithofaciès représente les conditions de la surface du lit, à la transition entre le débit subcritique et le débit critique.
- Les niveaux de gravier et/ou galet sont les niveaux contre lesquels le carottier vient butter. Ils n'ont donc pas pu être prélevés de manière systématique et ne peuvent pas être associés à un faciès précis. Tous ces niveaux sont donc rassemblés dans un faciès de substitution nommé G, qui peut être interprété comme la charge de fond d'un chenal.

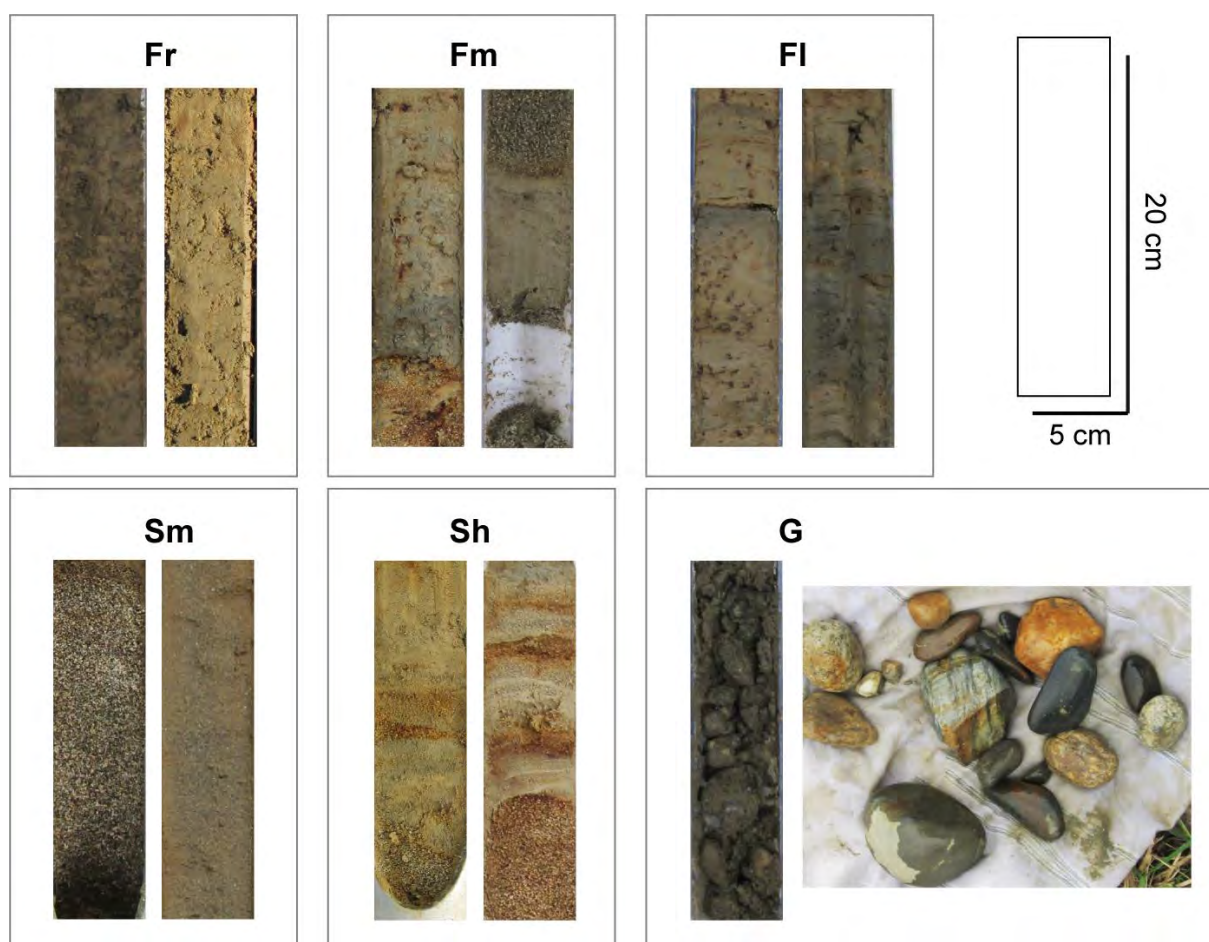


Figure 7.32 : Faciès sédimentaires identifiés dans la plaine de la Garonne et nommés d'après le référentiel de Miall (1996)

7.3.2.2. Caractérisation des processus de dépôt (Image CM)

L'image CM est un diagramme de référence permettant de déduire le processus à l'origine du dépôt d'un échantillon, en fonction de la relation entre la taille maximale (C) et la taille médiane (M) des grains. Ce diagramme a d'abord été proposé par R. Passega (1957, 1964), à partir de données empiriques sur trois types de milieux dans le bassin du Mississippi : la section principale, les berges semi-aquatiques et la section secondaire protégée des débits les plus forts. L'image CM, dans sa version initiale (Passega, 1957) se compose de trois segments (Fig. 7.33) :

- le segment PQ présente une forme verticale et correspond à des sédiments relativement grossiers, transportés dans la partie basse de la colonne d'eau ;
- le segment QR est parallèle à la limite $C=M$, ce qui signifie que C y est proportionnel à M. Toutes les particules de ce segment sont suffisamment petites pour être transportées en suspension, dans des eaux peu profondes ;
- le segment RS présente une forme horizontale car il se caractérise par une valeur seuil stricte de C (située à 200 microns dans le cas du Mississippi), qui définit la turbulence minimale du cours d'eau, alors que M peut varier.

A partir de données complémentaires récoltées sur différents bassins dans le monde, trois segments ont ensuite été ajoutés (Passega, 1964 - Fig. 7.33) :

- le segment NO correspond aux dépôts les plus grossiers transportés par roulement au fond du lit ;
- le segment OP correspond à des dépôts grossiers moins homogènes, transportés en partie par roulement au fond du lit et en partie par suspension graduée ;
- le segment T correspond enfin aux particules les plus fines, dites en suspension pélagique.

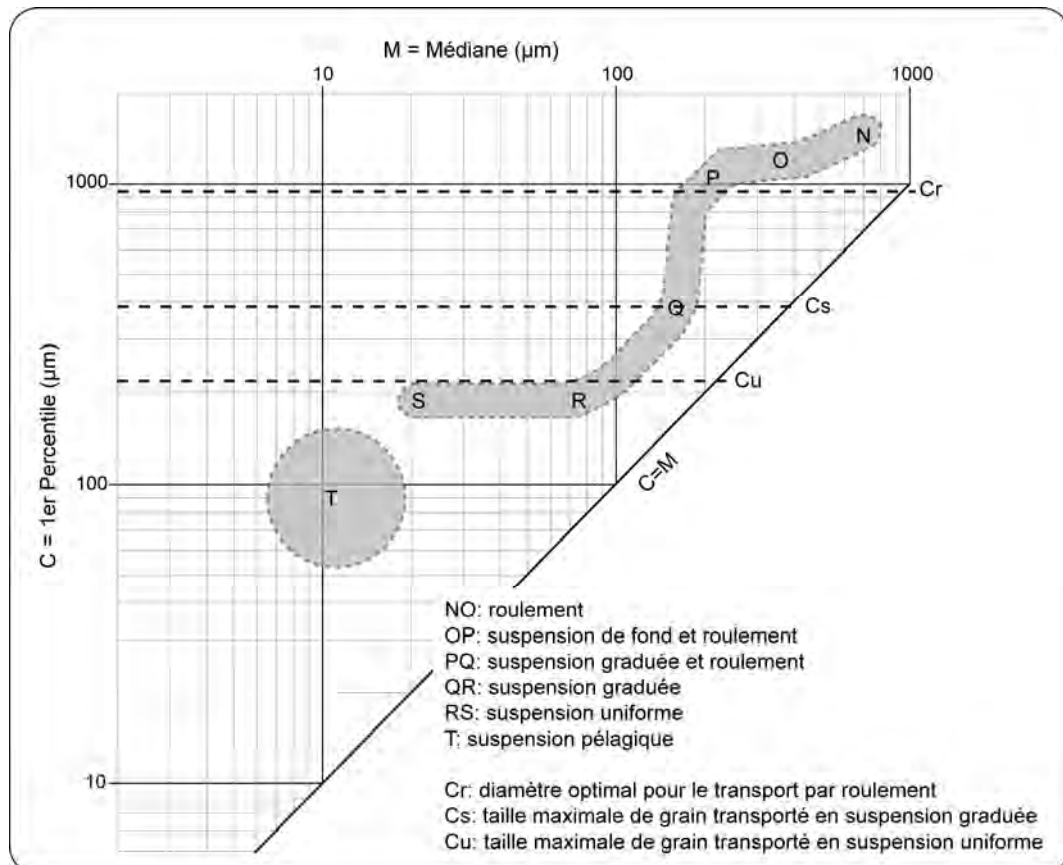


Figure 7.33 : Image CM (modifié d'après Passega, 1964)

La position et la longueur des segments de l'image CM peuvent varier d'un cours d'eau à un autre et de nombreuses versions ont été proposées depuis la fin des années 1960 pour différents bassins (Bravard, 1983 ; Arnaud-Fassetta, 2007 ; Houbrechts et al., 2013 ; Mycielska-Dowgiallo et Ludwikowska-Kedzia, 2011 ; Garnier, 2013 ; Lescure, 2015). Dans cette étude, aucun référentiel actuel permettant de caractériser les différents milieux de dépôt en Garonne toulousaine n'a pu être réalisé. Seule une analyse de la forme du nuage de points et de sa relation à la limite $C=M$ peut donc amener à distinguer des processus de dépôt. La projection des échantillons sur l'image CM permet d'identifier quatre à cinq segments (Fig. 7.34) :

- le segment QR, caractérisé par la proximité de sa forme et de ses valeurs avec la limite $C=M$, peut être subdivisé en deux unités : 1) le segment QR1 qui présente une parallèle parfaite avec la limite $C=M$ et rassemble les échantillons sableux à faible teneur en carbone de la classe 3 de l'ACP/CAH et 2) le segment QR2 dont l'angle annonce un niveau de transition entre QR et RS et qui rassemble une partie des échantillons de la classe 2 de l'ACP/CAH ;
- le segment RS, caractérisé par l'homogénéité des valeurs de C et la variabilité des valeurs de M ;
- le segment T, correspondant aux échantillons les plus fins, *i.e.* ceux de la classe 1 de l'ACP/CAH ;
- un groupe d'échantillons marginaux issus de la classe 2 de l'ACP/CAH présente enfin des valeurs de M largement au dessus du seuil QR/RS et des valeurs de C particulièrement faibles (QR3).

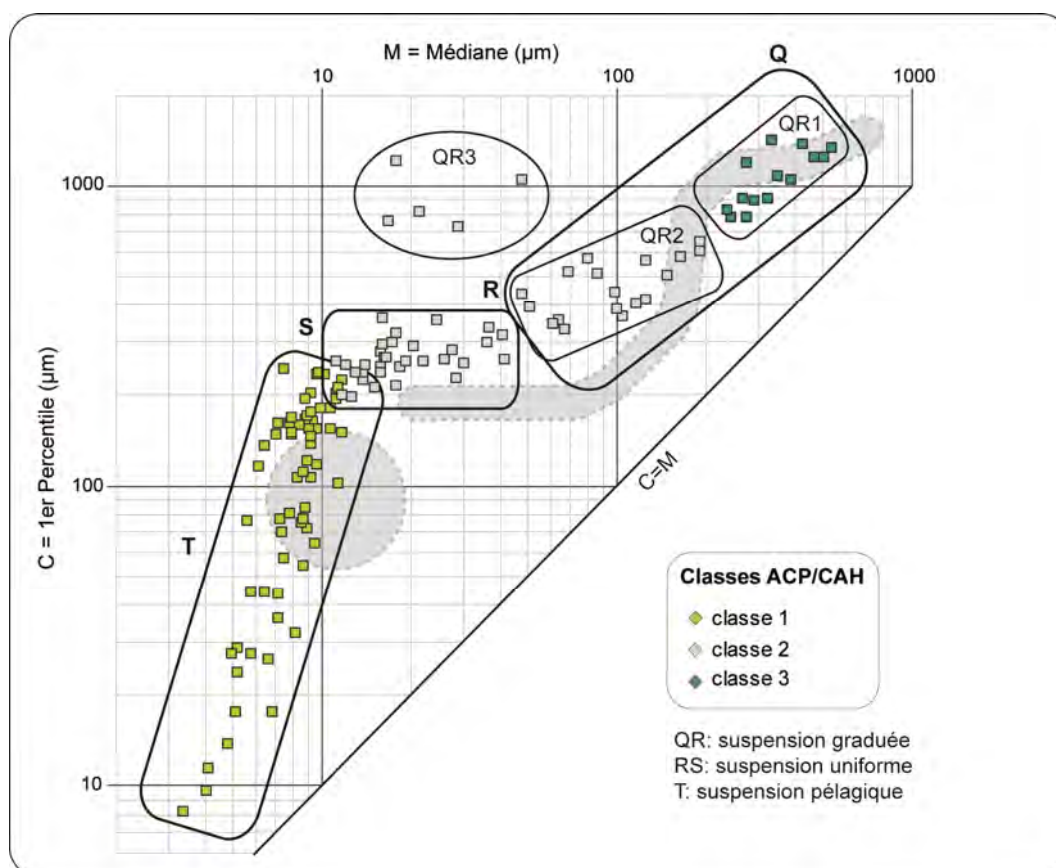


Figure 7.34 : Image CM définie à partir des échantillons de sédiment prélevés dans la plaine de la Garonne toulousaine

7.4. Conclusion du chapitre 7

Au total, 11 sites d'étude supposés correspondre à des paléochenaux de la Garonne ont été sondés le long du linéaire fluvial compris entre Toulouse et la confluence du Tarn. Ces sites sont répartis au sein de trois secteurs d'étude, retenus car ils semblent avoir été particulièrement dynamiques au cours des derniers siècles au regard des cartes historiques et de l'organisation du parcellaire :

- Secteur de Grenade/Ondes : site GRE supposé correspondre à un chenal médiéval au regard de la toponymie ; sites SESC, STRO et OND visibles en eau sur les cartes de 1810 et 1833 ;
- Secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale : sites PLUM, JUL et MAG, antérieurs à la période couverte par les cartes historiques ;
- Secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier : sites CORD1 et CORD3 antérieurs à la période couverte par les cartes historiques ; sites CORD2 et CORD4 visibles en eau sur la carte de 1850 et en phase de déconnexion sur la carte de 1868.

Sur chacun des paléochenaux ciblés, trois types de données ont été collectées, préférentiellement en pointe de méandre : 1) une ou plusieurs carotte(s) sédimentaire(s) ; 2) une tomographie de résistivité électrique et 3) un profil topographique. Par ailleurs, un modèle numérique de terrain (MNT) haute résolution (1 m) couvrant la vallée de la Garonne a été acquis en complément à la fin de la période de sondage, ce qui a permis d'appréhender plus finement l'organisation topographique des secteurs d'étude.

A partir du croisement de ces différentes données, la section mouillée à plein bord de chaque paléochenal a été délimitée. Sur la base de cette unité, deux indices de capacité hydraulique des chenaux ont été estimés : le paléodébit à plein bord et la puissance spécifique. Le stade de comblement des formes actuelles et leur vitesse de remplissage ont aussi été calculés.

Les carottes sédimentaires ont fait l'objet d'analyses complémentaires en laboratoire (granulométrie laser et perte au feu), qui ont servi à affiner les logs (mise en œuvre d'une typologie des échantillons prélevés à partir du traitement statistique multivarié des indices granulométriques et du croisement des résultats obtenus avec les indices de teneur en carbone). Ces données, mises en perspective à partir du référentiel de faciès de Miall (1996) et de l'image CM de Passega (1957, 1964), ont servi à évaluer le mode de remplissage des chenaux (processus et environnements de dépôt). Par ailleurs des macro-restes végétaux ont été prélevés dans les carottes et envoyés pour datation radiocarbone, afin d'apporter des éléments de chronologie dans l'analyse du remplissage sédimentaire.

Chapitre 8. - Analyse des données de terrain : données topographiques, tomographies de résistivité électrique (TRE) et logs sédimentaires

Ce chapitre vise à présenter l'ensemble des données de terrain recensées sur les sites d'étude des secteurs de Grenade/Ondes (1), Verdun-sur-Garonne/Dieupentale (2) et Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier (3).

Pour chacun des trois secteurs d'étude, l'analyse des données est proposée en trois temps : 1) la topographie de surface est d'abord analysée à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) haute résolution dans le but d'identifier des dépressions susceptibles de correspondre aux empreintes des paléochenaux ciblés et de vérifier l'emprise des sections de prospection électrique sur ces formes ; 2) les tomographies de résistivité électriques (TRE) levées en travers des paléochenaux sont décrites afin de délimiter les sections mouillées à plein bord et d'interpréter leur géométrie en termes de paléohydraulique, stade de comblement et vitesse de sédimentation et 3) les logs des carottes prélevées au sein des paléochenaux sont analysés dans l'optique d'identifier des phases différenciées dans le comblement des bras.

Dans le cas des chenaux antérieurs à la période couverte par les cartes historiques, des éléments de chronologie (datations radiocarbone) sont aussi apportés, qui permettent d'évaluer la date de déconnexion du chenal et de calculer une vitesse de sédimentation. La faible quantité d'échantillons organiques trouvés nous a toutefois poussé à tenter des datations sur sédiment, qui ont fourni des dates aberrantes. En conséquence, seules les dates obtenues à partir de fragments de bois ou de charbons sont présentées ici.

8.1. Caractérisation des paléochenaux du secteur de Grenade/Ondes

Dans le secteur de Grenade/Ondes quatre sites ont été sondés : le site GRE correspond à un chenal supposé médiéval, au pied du talus de terrasse rive gauche ; les sites SESC, STRO et OND correspondent aux bras d'un système à chenaux multiples visible sur la carte de 1833.

8.1.1. Analyse de la topographie de surface du secteur de Grenade/Ondes sur modèle numérique de terrain (MNT) haute résolution (1 m)

Dans le secteur de Grenade/Ondes, le modèle numérique de terrain (MNT) montre que les différents paléochenaux ciblés sont inégalement marqués dans la topographie (Fig. 8.1).

Sur le site GRE, une dépression large de 80 m environ, susceptible de correspondre au paléochenal ciblé, est traversée dans toute sa largeur par les sections de prospection électrique GRE.a et GRE.b (Figs. 8.1 et 8.2). Toutefois, aucun linéaire ne peut être clairement délimité sur le MNT. De plus, la section GRE.a n'est pas strictement perpendiculaire à la forme du chenal, ce qui conduira à surestimer les largeurs en sous-sol.

Sur le site SESC, le paléochenal est bien marqué dans la topographie mais sa forme s'avère complexe (Figs. 8.1 et 8.3). Une grande zone déprimée, large de 190 m environ, se subdivise en plusieurs chenaux de tailles réduites. Le chenal le mieux marqué dans la topographie présente une largeur de 38 m et est traversé dans toute sa largeur par la section de prospection électrique SESC.a.

Sur le site STRO, la dépression sensée correspondre au paléochenal ciblé présente une géométrie angulaire (Fig. 8.1) qui laisse penser qu'elle a fait l'objet de modifications anthropiques (activité extractrice). La section de prospection électrique STRO.a traverse un canal bien incisé (16 m - Figs. 8.1 et 8.3), limité par une digue de terre, mais ne couvre pas la dépression dans toute sa largeur, estimée de 71 m légèrement en amont du site de sondage.

Sur le site OND, une dépression large de 59 m est encore visible à l'emplacement du paléochenal ciblé (Figs. 8.1 et 8.3). Toutefois, la zone semble fortement perturbée par des aménagements (route et bâti). De ce fait, la section de prospection électrique est légèrement excentrée. Plus en aval, le chenal est mieux inscrit dans le paysage et présente une largeur de 43 m.

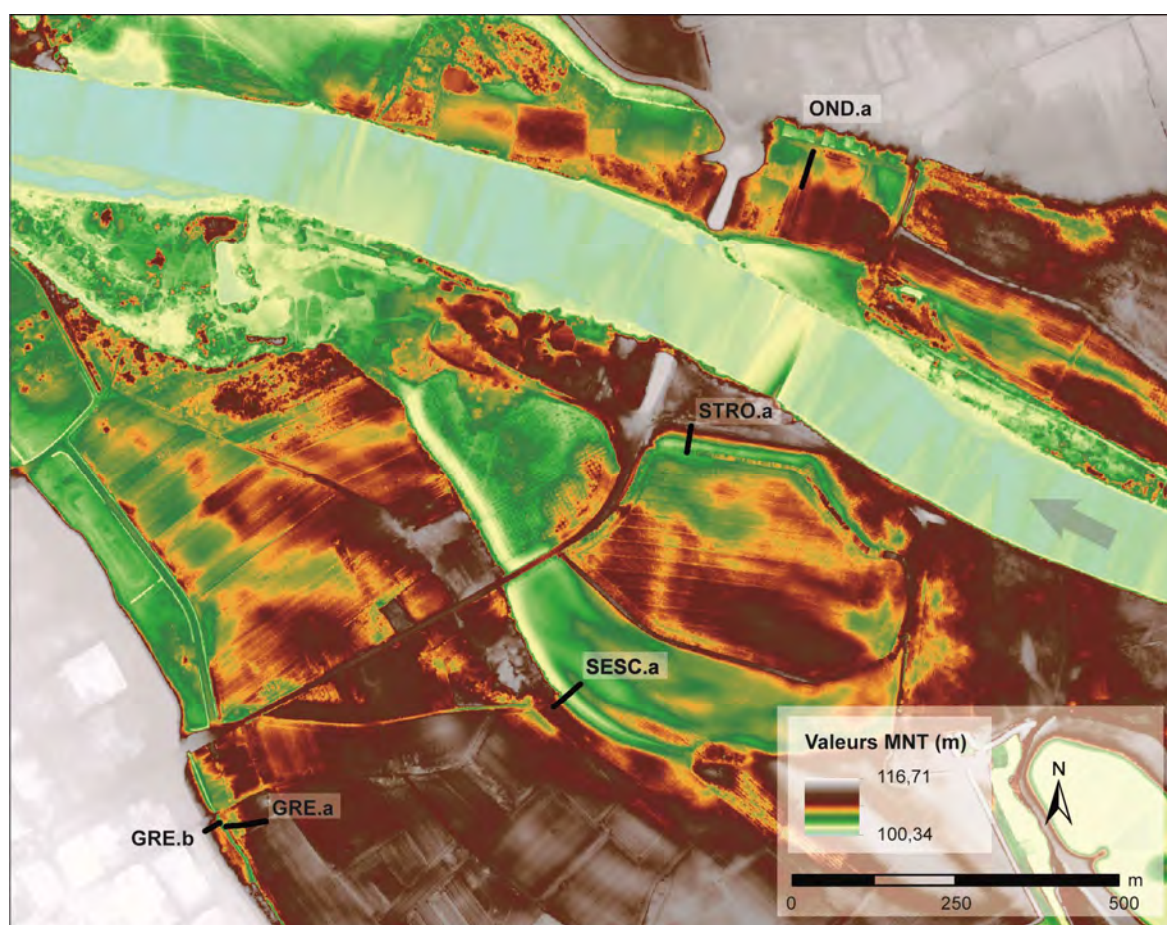


Figure 8.1 : MNT haute résolution (1 m) du secteur de Grenade/Ondes (Source : IGN)

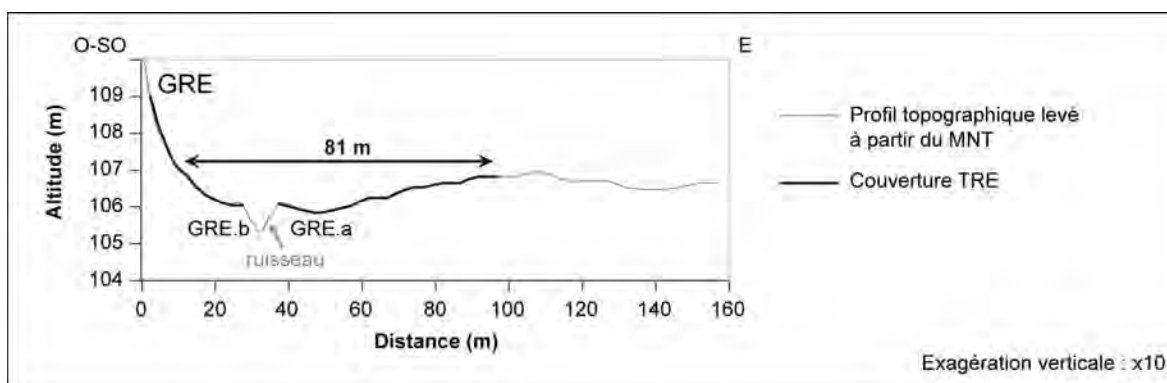


Figure 8.2 : Profil topographique levé à partir du MNT sur le site GRE.

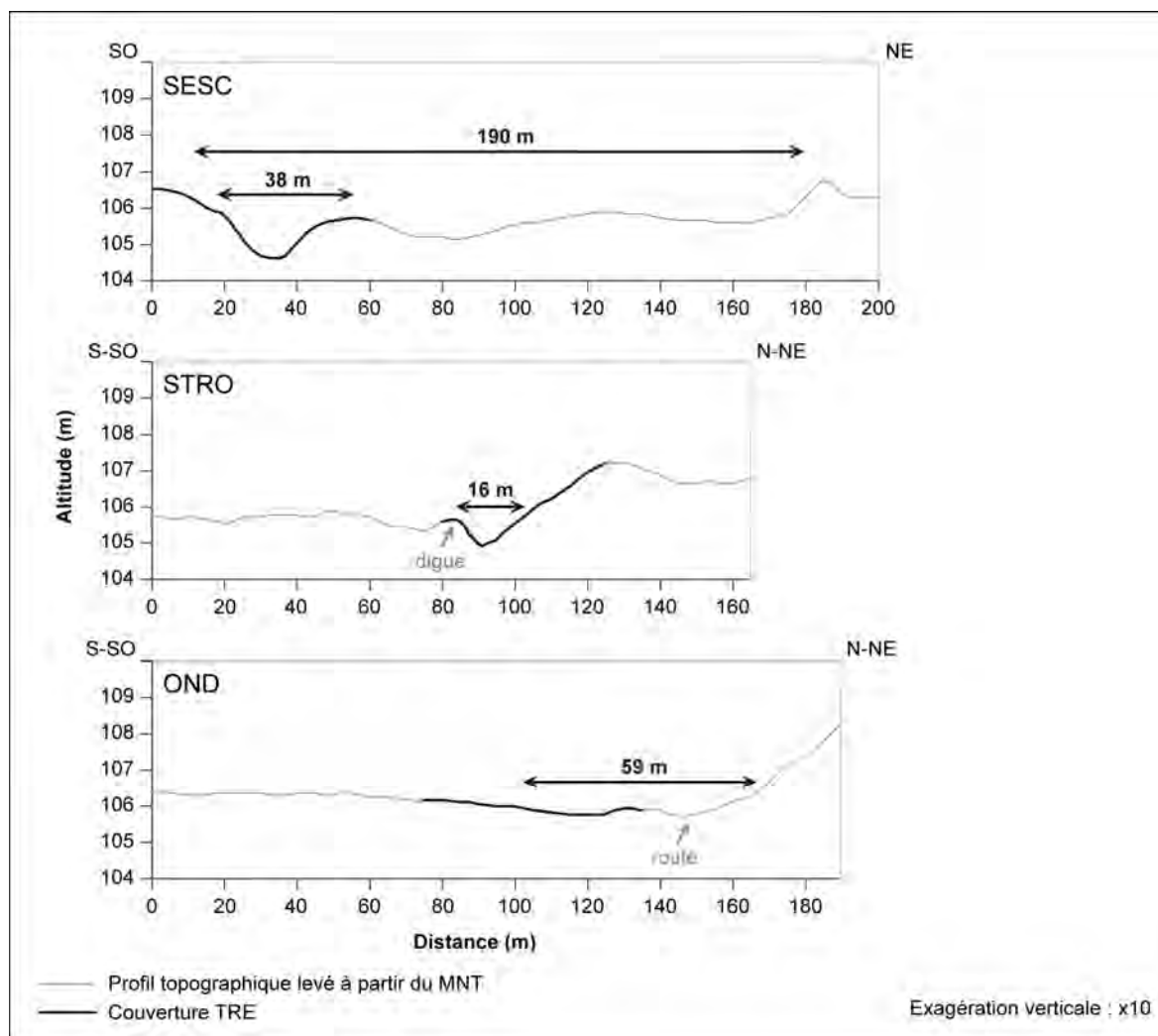


Figure 8.3 : Profils topographiques levés à partir du MNT sur les sites SESC, STRO et OND. Les dépressions susceptibles de correspondre à des paléochenaux sont délimitées par une double flèche.

8.1.2. Analyse et interprétation de la géométrie du sous-sol dans le secteur de Grenade/Ondes à partir des tomographies de résistivité électrique (TRE)

8.1.2.1. Identification des paléochenaux sur les TRE

Les informations concernant les tomographies de résistivité électrique (TRE) levées sur les paléochenaux du secteur de Grenade/Ondes sont données dans la table 8.1. Les sections en elles-mêmes sont présentées sur la figure 8.4.

| Site | Section TRE | Larg. dép. (m) | Long. TRE (m) | Déniv. TRE (m) | Ecart. élec. (m) | Prof. max. (m) | Résist. min. (/m) | Résist. max. (/m) | Etendue (/m) |
|-------------|-------------|----------------|---------------|----------------|------------------|----------------|--------------------|--------------------|---------------|
| GRE | GRE.a | 81 | 63 | 0,89 | 1 | 7 | 11 | 1272 | 1261 |
| | GRE.b | | 25 | 2,74 | 1 | 4 | 11 | 116 | 105 |
| SESC | SESC.a | 38 | 55 | 1,97 | 1 | 7 | 11 | 301 | 290 |
| STRO | STRO.a | 71 | 37 | 2,11 | 1 | 7 | 31 | 537 | 506 |
| OND | OND.a | 59 | 57 | 0,48 | 1 | 7 | 21 | 1067 | 1046 |

Table 8.1 : Données concernant les TRE du secteur de Grenade/Ondes. Largeur de la dépression topographique identifiée sur le MNT ; longueur de la section de prospection électrique ; dénivelé de la section de prospection électrique ; écartement entre les électrodes ; profondeur maximale de mesure ; valeur minimale de résistivité électrique ; valeur maximale de résistivité électrique ; étendue des valeurs de résistivité électrique.

Sur le site GRE, la TRE GRE.a (63 m de longueur et 7 m de profondeur) présente des valeurs de résistivité contrastées, comprises entre 11 et 1272 /m. Elle se structure en deux ensembles (Fig. 8.4) : la moitié est se compose d'un corps sédimentaire lobé particulièrement résistant (valeurs comprises entre ~66 et 1272 /m) ; la moitié ouest est plus conductrice, avec des valeurs de résistivité de l'ordre de 42 à 104 /m en profondeur et un corps très conducteur en surface (de 11 à 42 /m). La TRE GRE.b, réalisée en prolongement de la section GRE.a, au pied du talus de terrasse, est marquée par un fort dénivelé (2,74 m). Les mesures géophysiques n'atteignent ici que 4 m de profondeur, en raison de la longueur réduite de la section (25 m). La quasi-totalité de la TRE présente des valeurs de résistivité très faibles (comprises entre 11 et 42 /m), qui apparaissent en continuité avec le corps de faible résistivité identifié sur la section GRE.a. Cette unité est surmontée d'un corps plus résistant à l'extrémité ouest de la section (point culminant), avec des valeurs comprises entre 42 et 116 /m. L'association des deux TRE GRE.a et GRE.b, met en évidence un corps sédimentaire de faible résistivité d'une largeur d'environ 55 m sur le site GRE, susceptible de correspondre au remplissage du paléochenal ciblé (Fig. 8.4).

Les mesures effectuées sur le site SESC (55 m de longueur et 7 m de profondeur) présentent des valeurs de résistivité relativement peu contrastées, comprises entre 11 et 301 /m. Un niveau relativement résistant (~66 à 301 /m) est observé en profondeur, sur lequel repose un corps dépressionnaire plus conducteur (11 à 66 /m) de 38 m de largeur environ, susceptible de correspondre au remplissage du paléochenal ciblé (Fig. 8.4).

Les mesures effectuées sur le site STRO (37 m de longueur et 7 m de profondeur) atteignent des valeurs comprises entre 31 et 537 /m. Deux corps relativement résistants s'individualisent entre 2 et 7 m de profondeur : le premier, sur la moitié N-NE de la section, présente des valeurs comprises entre 66 et 537 /m et une pente accentuée par rapport à la topographie de surface ; le second, sur la moitié S-SO, présente des valeurs de résistivité plus faibles (entre 66 et ~254 /m). La partie supérieure de la section est plus conductrice (entre ~27 et 66 /m), toutefois aucun corps dépressionnaire susceptible de correspondre à un paléochenal n'est clairement identifiable (Fig. 8.4).

La section levée sur le site OND (57 m de longueur et 7 m de profondeur) présente des valeurs de résistivité plus contrastées, comprises entre 21 et 1067 /m. Entre 2 et 7 m de profondeur, la TRE OND.a révèle une série horizontale de trois corps sédimentaires de forte résistivité (entre 66 et 1067 /m). Les valeurs de résistivité se réduisent progressivement vers la surface, avec : 1) une zone d'une quinzaine de mètres de longueur et 1 m d'épaisseur sur la moitié S-SO de la section, caractérisée par des valeurs de résistivité de l'ordre de 42 à 66 /m et 2) un corps sédimentaire dépressionnaire plus net et plus conducteur (de 21 à 66 /m) de 25 m de longueur et 2 m d'épaisseur à l'extrémité N-NE de la section, susceptible de correspondre au remplissage du paléochenal ciblé (Fig. 8.4).

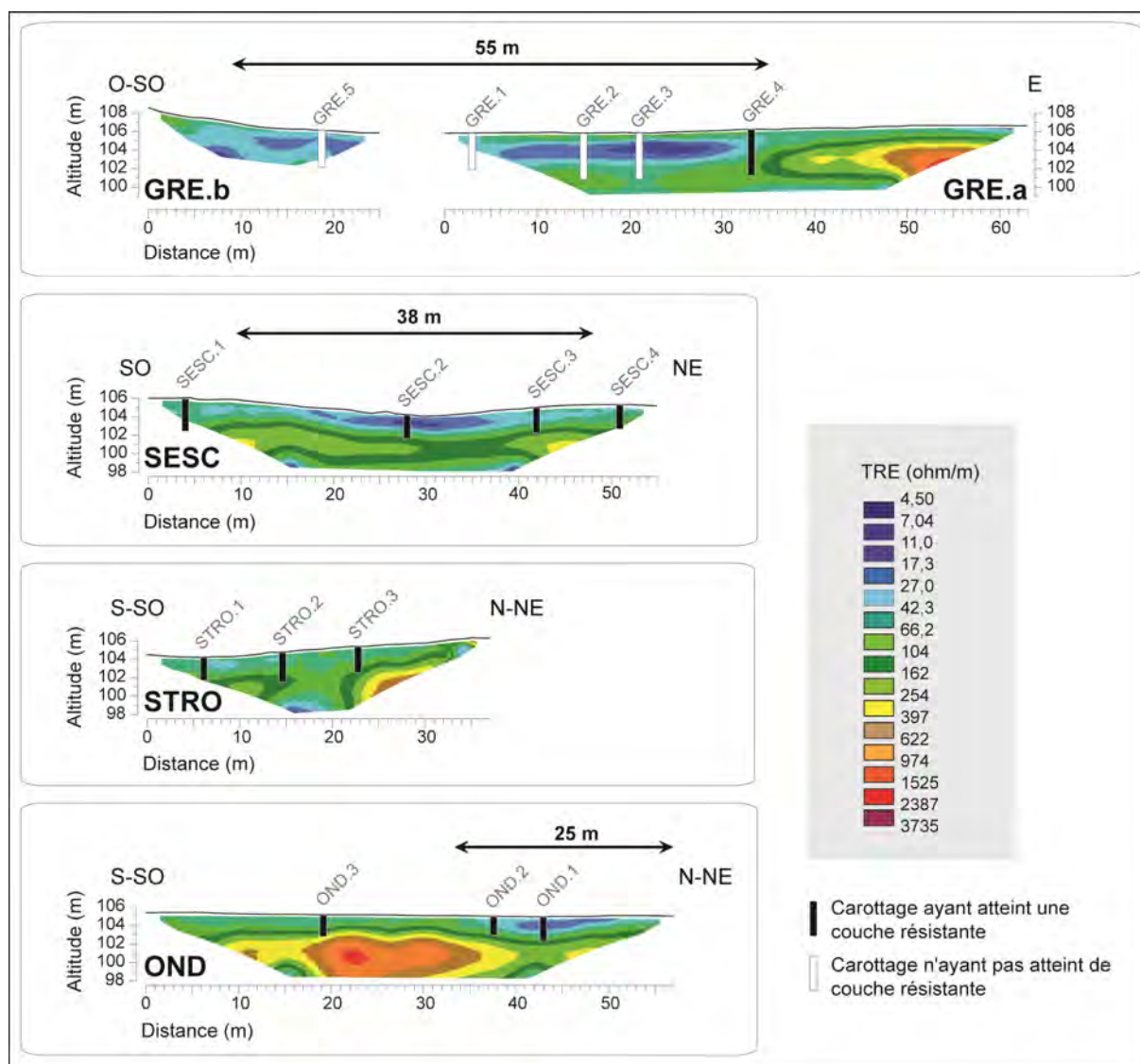


Figure 8.4 : TRE levées dans le secteur de Grenade/Ondes. Les corps dépressionnaires susceptibles de correspondre à des paléochenaux sont délimités par une double flèche.

8.1.2.2. Délimitation des sections mouillées à plein bord et interprétation en termes de paléohydraulique, stade de comblement et vitesse de sédimentation

Les sections mouillées à plein bord des paléochenaux du secteur de Grenade/Ondes sont délimitées sur la figure 8.5. Les informations concernant le calcul des indices paléohydrauliques, des stades de comblement et des vitesses de sédimentation sont synthétisées dans la table 8.2. Les profondeurs atteintes par les carottages, utiles à la délimitation des sections mouillées, sont listées plus loin, dans la table 8.3.

| Site | S (m²) | P (m) | Q (m³/s) | L (m) | (w/m²) | Sr (m²) | SC (%) | Er (cm) | t0 | VS (cm/an) |
|---------------------|--------|-------|----------|-------|--------|---------|--------|---------|------|------------|
| GRE | 396 | 166 | 553 | 81 | 34 | 358 | 90 | 437 | - | - |
| SESC | 104 | 77 | 99 | 38 | 13 | 82 | 79 | 213 | 1842 | 1,24 |
| STRO | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OND (scénario 1) | 45 | 52 | 32 | 25 | 6 | 44 | 98 | 181 | 1842 | 1,05 |
| OND (scénario 2) | 101 | 119 | 71 | 59 | 6 | - | - | - | - | - |

Table 8.2 : Indices paléohydrauliques, stades de comblement et vitesses de remplissage calculés sur les paléochenaux du secteur de Grenade/Ondes. Aire de la section mouillée à plein bord (S) ; périmètre de la section mouillée à plein bord (P) ; débit à plein bord (Q) ; largeur à plein bord (L) ; puissance spécifique () ; aire de la section mouillée occupée par le remplissage sédimentaire (Sr) ; stade de comblement (SC) ; épaisseur moyenne du remplissage (Er) ; date estimée de la déconnexion du bras (t₀) ; vitesse de sédimentation (VS). La valeur de pente utilisée pour calculer les paléodébits à plein bord et puissances spécifiques dans le secteur de Grenade/Ondes est 0,0005 m/m (Source : IGN PROFILS).

Sur le site GRE, la grave a été atteinte à 4,70 m de profondeur au point de carottage GRE.4 (Table 8.3), qui se trouve légèrement excentré sur la rive droite du paléochenal (Fig. 8.5). Ce niveau correspond à des valeurs de résistivité de l'ordre de 66 à 104 /m. Le fond a donc été délimité en prolongeant cette ligne de valeur. En raison de l'absence de données dans la partie centrale du paléochenal, liée à la présence d'un ruisseau, une partie du fond a toutefois dû être extrapolée. En surface, le point de débordement du chenal a été estimé au niveau de la rupture de pente visible à l'extrémité E, car les valeurs croissantes de résistivité et la forme de la pente à l'extrémité O-SO suggèrent un recouvrement partiel du chenal par un niveau colluvial. La section mouillée à plein bord ainsi obtenue (396 m²) donne un paléodébit à plein bord estimé à 553 m³/s et une puissance spécifique de 34 w/m². Le remplissage occupe 90 % de la section mouillée, toutefois aucune archive révélant la date de déconnexion n'est disponible à ce stade de l'analyse, ce qui empêche pour l'instant d'estimer la vitesse de sédimentation (estimation possible à partir de datations radiocarbone - cf. 3.1.3.1).

Sur le site SESC, la grave a été atteinte à 2,45 m de profondeur au centre du paléochenal (carotte SESC.2 - Table 8.3 et Fig. 8.5), ce qui correspond à une valeur de résistivité électrique d'environ 104 /m. Le fond du chenal a été délimité en suivant ce niveau de résistivité électrique sur la TRE. La section mouillée à plein bord obtenue couvre une surface de 104 m², qui a permis d'estimer un débit à plein bord de 99 m³/s et une puissance spécifique de 13 w/m². Le remplissage sédimentaire occupe 79% de la section mouillée, soit une épaisseur moyenne de 2,13 m. Au regard des cartes historiques, le bras sondé sur le site SESC s'est déconnecté du chenal principal entre 1833 et 1850. En considérant 1842 comme date potentielle de déconnexion, il est possible d'envisager une vitesse moyenne de sédimentation de 1,24 cm/an.

Sur le site STRO, il est probable d'après l'analyse de la topographie de surface (Figs. 8.1 et 8.3), que le paléochenal soit plus large que la section de prospection électrique STRO.a et qu'il ait en plus subi des modifications anthropiques (activité extractrice). De plus, aucun corps dépressionnaire n'a clairement été identifié en profondeur (Fig. 8.4). En conséquence, aucune section mouillée n'a été délimitée pour ce site.

Sur le site OND, deux carottes sur trois ont été prélevées dans la zone dépressionnaire de faible résistivité électrique observée sur la TRE OND.a (Fig. 8.5). Le carottage effectué au

centre du paléochenal (OND.1) a atteint la grave à 2,50 m de profondeur (Table 8.3), ce qui correspond à nouveau à une valeur de résistivité électrique de l'ordre de 104 Ω /m. La délimitation du fond du lit à partir de cette valeur seuil permet d'identifier une section mouillée à plein bord de 45 m², qui conduit à l'estimation d'un paléodébit à plein bord de 32 m³/s et d'une puissance spécifique de 6 w/m². Le remplissage occupe 98% de cette section mouillée, soit une épaisseur moyenne de 1,81 m. En considérant à nouveau une déconnexion aux alentours de 1842, la vitesse de sédimentation est estimée à 1,05 cm/an. Sur ce site, la topographie étant fortement perturbée par les aménagements (notamment par une route), un second scénario a été envisagé, basé sur une section mouillée à plein bord plus large (59 m - cf. Fig. 8.3). Le paléodébit à plein bord estimé à partir de cette section mouillée est 71 m³/s, tandis que la puissance spécifique reste à 6 w/m².

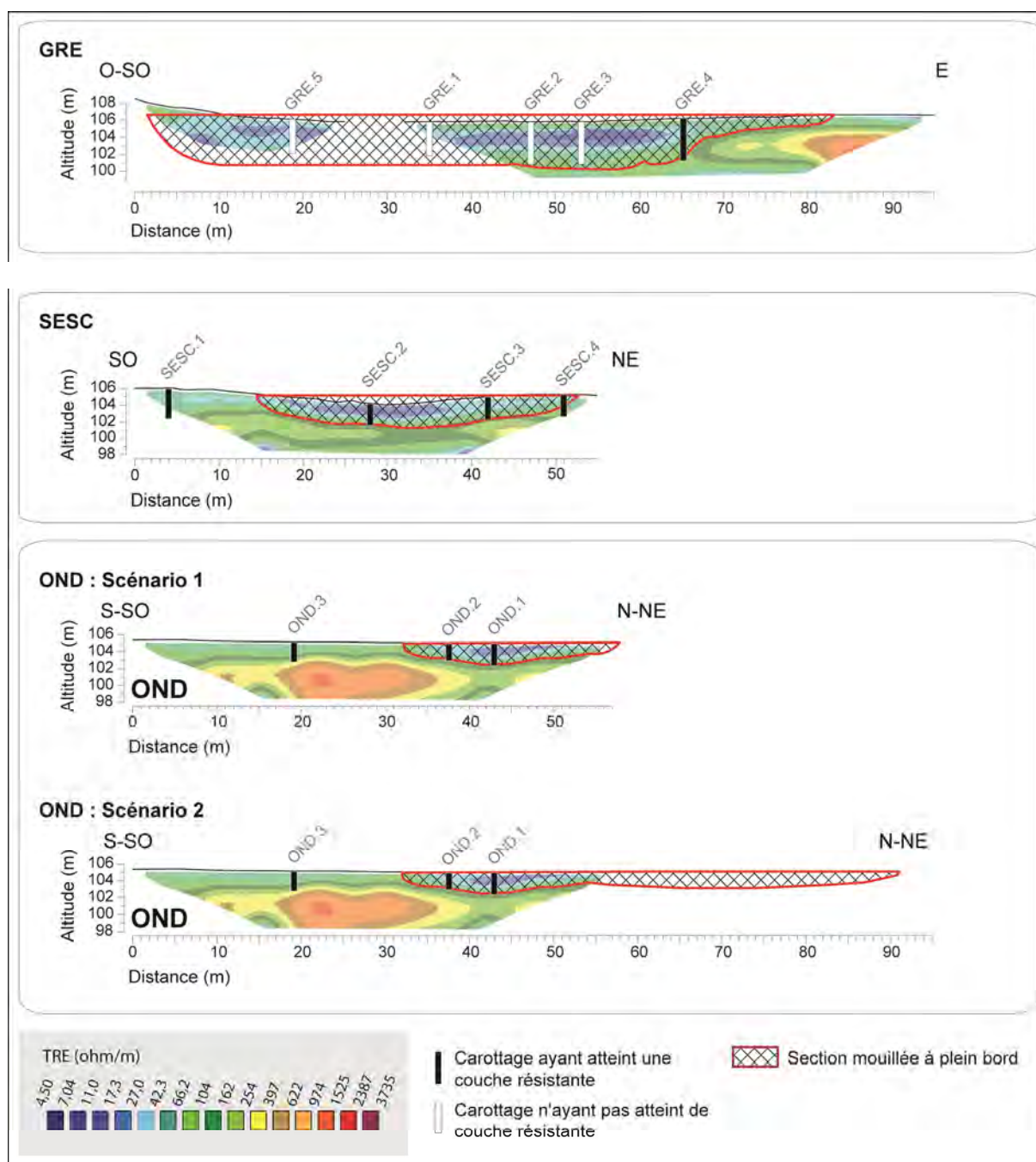


Figure 8.5 : Délimitation des sections mouillées à plein bord à partir des TRE levées dans le secteur de Grenade/Ondes.

8.1.3. Analyse du remplissage des paléochenaux du secteur de Grenade/Ondes à partir des logs sédimentaires

Les informations concernant les carottages réalisés dans le secteur de Grenade/Ondes (longueur prélevée, longueur perdue et profondeur à laquelle la grave a été atteinte) sont synthétisées dans la table 8.3. Les logs pour lesquels une analyse sédimentaire approfondie a été réalisée (GRE.5, SESC.2, STRO.1 et OND.1) sont présentés sur les figures 8.6 à 8.9.

| Site | Carotte | Gouge | Longueur prélevée (m) | Longueur perdue (m) | Profondeur de la grave (m) |
|------|---------|---------|-----------------------|---------------------|----------------------------|
| GRE | GRE.1 | ouverte | 3,50 | 0,50 | - |
| | GRE.2 | ouverte | 4,45 | 0,55 | - |
| | GRE.3 | ouverte | 4,25 | 0,75 | - |
| | GRE.4 | ouverte | 5,00 | 0,00 | 4,70 |
| | GRE.5 | fermée | 4,00 | 0,00 | - |
| SESC | SESC.1 | ouverte | 3,50 | 0,00 | 3,30 |
| | SESC.2 | ouverte | 2,55 | 0,00 | 2,45 |
| | SESC.3 | ouverte | 2,55 | 0,20 | 2,55 |
| | SESC.4 | ouverte | 2,60 | 0,00 | 2,40 |
| STRO | STRO.1 | ouverte | 2,45 | 0,00 | 2,40 |
| | STRO.2 | ouverte | 3,15 | 0,00 | 3,10 |
| | STRO.3 | ouverte | 2,80 | 0,00 | 2,80 |
| OND | OND.1 | ouverte | 2,60 | 0,00 | 2,50 |
| | OND.2 | ouverte | 2,00 | 0,00 | 1,90 |
| | OND.3 | ouverte | 2,30 | 0,00 | 2,30 |

Table 8.3 : Informations concernant les carottages réalisés dans le secteur de Grenade/Ondes. Les lignes grisées correspondent aux carottes qui ont fait l'objet d'une analyse sédimentaire approfondie.

8.1.3.1. Du log à l'interprétation des processus et environnements de dépôt : la carotte GRE.5

Au total, cinq carottes ont été prélevées sur le site GRE. La carotte GRE.5, prélevée à l'extrémité O-SO du paléochenal identifié sur les TRE GRE.a et GRE.b (Fig. 8.5), a fait l'objet d'une analyse sédimentaire approfondie (Fig. 8.6). Les autres carottes ont essentiellement servi à situer le fond de la dépression. Une analyse plus détaillée de ces carottes est toutefois proposée dans David et al. (2015).

La carotte GRE.5 (4 m de longueur - Fig. 8.6-A) présente d'épais niveaux limoneux massifs et racinaires jusqu'à 2,80 m de profondeur (faciès Fr - Miall, 1996). Les échantillons prélevés dans ces niveaux appartiennent principalement à la classe granulométrique 1 jusqu'à 2 m de profondeur (argiles à limons fins, relativement chargés en matière organique et en carbonate) et à la classe granulométrique 2 entre 2 et 2,80 m de profondeur (niveaux sablo-limoneux à limono-sableux, moins chargés en carbone organique)⁴. A partir de 2,80 m, la granulométrie devient sableuse (faciès Sm et Sh - Miall, 1996). Les échantillons sédimentaires extraits entre 2,80 et 4 m appartiennent majoritairement à la classe granulométrique 3 (sables fins à grossiers, caractérisés par des teneurs très faibles en carbone organique et en carbonate) et la limite inférieure de la série sableuse n'a pas été atteinte en raison du manque de cohésion des sédiments en profondeur, qui empêche leur extraction (blocage du tube). A ces profondeurs, les niveaux sont moins épais qu'en surface

⁴ Cf. 2.1.4 du chapitre 7 pour le détail des classes granulométriques.

et alternent avec des niveaux à granulométrie plus fine (faciès Fm - Miall, 1996). Par ailleurs, ils contiennent ponctuellement des fragments végétaux. Deux fragments de bois ont ainsi été prélevés pour datation radiocarbone.

Le log de synthèse, réalisé à partir du référentiel de faciès proposé par Miall (1996) et corrélé à la projection des échantillons sédimentaires sur l'image CM, révèle une opposition entre deux environnements de dépôt distincts (Fig. 8.6-B) : 1) des dépôts caractéristiques des plaines alluviales en surface (faciès Fr), associés à des processus de décantation et suspension uniforme (segments T et RS de l'image CM) et repris par des processus pédogéniques et 2) des dépôts caractéristiques des chenaux secondaires ou bras morts en profondeur, marqués par des variations de débit significatives, avec une alternance entre des apports grossiers de crue rapide (faciès Sm et Sh / segment QR de l'image CM) et des apports fins d'eau quasi-stagnante (faciès Fm / segment RS de l'image CM). Les niveaux perdus en profondeur suggèrent une charge sableuse disponible abondante au moment de la déconnexion du bras.

Le premier fragment de bois daté au ^{14}C (*Coniferus* indéterminé ; cf *Juniperus* - Table 8.4) a été prélevé au sein d'un niveau fin, entre 3,25 et 3,26 m de profondeur. Ce fragment a été daté à 1265-1295 cal. AD (2 sigma) ou 1370-1380 cal. AD (2 sigma). Compte tenu de la morphologie du bois de l'arbre identifié (petite branche), cette date est proche de la date réelle du niveau dans lequel le fragment a été prélevé. Le second fragment (*Abies alba*) a été prélevé à une profondeur de 3,56-3,57 m au sein d'un épais niveau de type Sh et a été daté à 1215-1280 cal. AD (2 sigma). Là encore, la partie de l'arbre identifiée (branche ou tronc d'un diamètre inférieur à 10 cm) permet d'avoir un calage chronologique fiable. Ces dates permettent de situer la phase de déconnexion du chenal au Moyen-Âge central. Par ailleurs, une vitesse de sédimentation de 0,47 cm/an a pu être estimée à partir de l'échantillon le plus profond (Table 8.4).

| ID échantillon | N° laboratoire | Matériel traité | Détermination | Age BP conventionnel | Datation cal. 2 sigma BP | Datation cal. 2 sigma AD | Vitesse de sédimentation (cm/an) |
|----------------|----------------|-----------------|--|----------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| GRE5-325-326 | Beta-378552 | bois | <i>Coniferus</i> indéterminé ; cf <i>Juniperus</i> | 710 ± 30 | 685 à 655 | 1265 à 1295 | 0,44 |
| | | | | | 580 à 570 | 1370 à 1380 | 0,51 |
| GRE5-356-357 | Beta-378553 | bois | <i>Abies Alba</i> | 780 ± 30 | 735 à 670 | 1215 à 1280 | 0,47 |

Table 8.4 : Dates radiocarbone sur le site GRE. Les identifiants (ID) des échantillons datés correspondent au nom de la carotte, suivie de la profondeur de prélèvement en cm.

8.1.3.2. Du log à l'interprétation des processus et environnements de dépôt : la carotte SESC.2

Sur le site SESC, quatre carottes ont été prélevées d'une berge à l'autre du paléochenal identifié sur la TRE SESC.a (Figs. 8.5). La carotte SESC.2, prélevée au point le plus bas de la dépression, a fait l'objet d'une analyse sédimentaire approfondie (Fig. 8.7). Les autres carottes ont servi à situer le fond du chenal.

La carotte SESC.2 (2,55 m de longueur - Fig. 8.7-A) est essentiellement composée de niveaux limoneux massifs (faciès Fr et Fm - Miall, 1996) ou ponctuellement stratifiés (entre 1,85 et 2 m, faciès FI - Miall, 1996). Seul un niveau de sable fin est observé entre 0,82 et 1,07 m de profondeur (faciès Sm - Miall, 1996). Les échantillons prélevés dans cette carotte appartiennent majoritairement à la classe granulométrique 2 (niveaux sablo-limoneux à limono-sableux, peu chargés en carbone organique) et plus ponctuellement à la classe 1 (argiles à limons fins, relativement chargés en matière organique et en carbonate). Entre

2,45 et 2,55 m, le carottage a rencontré une couche de graviers, avant d'atteindre un niveau plus résistant, probablement une couche de galets.

Contrairement à ce qui a été observé sur le site GRE, les éléments de synthèse pour le site SESC (faciès de Miall et Image CM - Fig. 8.7-B) traduisent une certaine homogénéité des niveaux de remplissage du chenal. En effet, le log de synthèse se caractérise par la prédominance du faciès Fr (jusqu'à 1,85 m de profondeur) et l'image CM montre que les dépôts sont essentiellement associés à un processus de suspension uniforme. Ces résultats peuvent être interprétés comme le signe d'une forte emprise des processus de pédogenèse sur le remplissage de ce chenal, qui brouillent l'enregistrement des différentes phases d'apport sédimentaires.

8.1.3.3. Du log à l'interprétation des processus et environnements de dépôt : la carotte STRO.1

Sur le site STRO, trois carottes ont été prélevées au sein de la dépression topographique supposée correspondre à un chenal déconnecté au cours du XIX^e siècle mais pour lequel aucune géométrie en creux n'a clairement été détectée en sous-sol (Fig. 8.4). La carotte STRO.1 a été prélevée dans la zone la plus basse révélée par le profil topographique et a fait l'objet d'analyses sédimentaires approfondies (Fig. 8.8). Les deux autres carottes sont décrites dans David et al. (2015).

La carotte STRO.1 (2,45 m de longueur - Fig. 8.8-A) présente des niveaux limoneux massifs jusqu'à 1,87 m de profondeur, marqués par la présence de racines en surface (faciès Fr - Miall, 1996). Les échantillons prélevés dans ces niveaux appartiennent principalement à la classe granulométrique 1 (argiles à limons fins, relativement chargés en matière organique et en carbonate). Toutefois un niveau graveleux fin est observé entre 0,16 et 0,23 m. A partir de 1,57 m de profondeur, les limons deviennent stratifiés (faciès FI - Miall, 1996) et sont alternés avec des niveaux sableux appartenant à la classe granulométrique 3 (sables fins à grossiers, caractérisés par des teneurs très faibles en carbone organique et en carbonate). Ces niveaux sableux (faciès Sm et Sh - Miall, 1996) deviennent dominants dans la partie basse de la carotte, entre 2,10 et 2,40 m. A 2,40 m de profondeur, le carottier a butté sur un niveau de galets.

Le log de synthèse et l'image CM (Fig. 8.8-B) révèlent une opposition entre deux environnements de dépôt distincts, avec : 1) des dépôts caractéristiques des plaines alluviales en surface (faciès Fr), associés aux processus de décantation et suspension uniforme (segment RS et partie haute du segment T de l'image CM) et repris par des processus pédogéniques et 2) des dépôts plus caractéristiques des chenaux secondaires ou bras morts en profondeur, marqués par l'enregistrement d'une variation relativement régulière du débit, susceptible de correspondre à des phases de réouverture du bras ou de débordement du chenal actif dans la plaine, à l'occasion des crues.

8.1.3.4. Du log à l'interprétation des processus et environnements de dépôt : la carotte OND.1

Comme sur le site STRO, trois carottes ont été prélevées sur le site OND (Fig. 8.5). Les carottes OND.1 et OND.2 sont situées au niveau du paléochenal identifié dans la topographie de surface. La carotte OND.1, prélevée dans la partie la plus profonde du chenal visible sur la TRE OND.a, a fait l'objet d'une analyse sédimentaire approfondie (Fig. 8.9). Les autres carottes ont servi à situer le niveau résistant correspondant au fond du chenal mais ne sont pas décrites ici (cf. David et al., 2015).

Comme observé sur les autres sites du secteur de Grenade/Ondes, la carotte OND.1 (Fig.8.9-A) présente d'épais niveaux limoneux massifs en surface, jusqu'à 1,56 m de profondeur (faciès Fr - Miall, 1996). Les échantillons prélevés dans ces niveaux appartiennent aux classes granulométriques 1 et 2 (niveaux argileux à limono-sableux, relativement chargés en carbonate et en carbone organique). A partir de 1,56 m de profondeur, la carotte devient sableuse (faciès Sm - Miall, 1996). Les niveaux observés se caractérisent d'abord par des sables fins (classe granulométrique 2), puis par des sables plus grossiers à partir de 2 m de profondeur (classe granulométrique 3). Ces niveaux alternent ponctuellement avec des granulométries plus fines (faciès Fm et Fl - Miall, 1996). Un épais niveau de limon fin stratifié (Fl) est notamment observé à la base de la carotte.

Le log de synthèse (Fig. 8.9-B) révèle ici encore la présence du faciès Fr en surface, caractéristique des formations de plaine alluviale. Les échantillons prélevés dans ces niveaux se situent dans la partie haute du segment T et dans le segment RS de l'image CM, respectivement associés aux processus de décantation et de suspension uniforme. A partir de 1,56 m, une alternance de faciès principalement sableux (classes granulométriques 2 et 3), révèle des variations dans la vitesse d'écoulement de la lame d'eau au sein du chenal, susceptibles de correspondre à des phases de réouverture du bras mort ou à des apports liés au débordement du chenal actif.

8.1.4. Synthèse des informations recensées dans le secteur de Grenade/Ondes

Quatre sites ont été sondés dans le secteur de Grenade/Ondes : GRE, SESC, STRO et OND. Les sondages effectués sur le site GRE ciblaient un paléochenal supposé médiéval, détecté à partir d'indices toponymiques. Les trois autres sites ciblaient des chenaux formant un système à bras multiples au cours du XIX^e siècle, représentés en eau sur la carte de 1833. Sur le site STRO, aucun chenal n'a pu être clairement identifié en sous-sol, probablement en raison de perturbations anthropiques. Sur les sites GRE, SESC et OND, les paléochenaux ciblés ont été clairement identifiés à partir du croisement des données topographiques, géophysiques et sédimentaires.

Sur le site GRE, le paléochenal ciblé est comblé à 90%. Il présente une largeur d'environ 80 m et se caractérise par un paléodébit à plein bord estimé de 553 m³/s et une puissance spécifique de 34 w/m². Sur les sites SESC et OND, les formes observées présentent des capacités hydrauliques nettement inférieures. Le chenal SESC (38 m de largeur) se caractérise par un paléodébit à plein bord estimé de 99 m³/s et une puissance spécifique de 13 w/m². Ce chenal est aujourd'hui comblé à 79%. Le chenal OND (59 m de largeur) se caractérise par un paléodébit à plein bord de 71 m³/s et une puissance spécifique de 6 w/m². Toutefois, ce chenal n'a pas été appréhendé dans toute sa largeur par les prospections électriques en raison de la présence d'une route. La section mouillée à plein bord a donc été prolongée arbitrairement sur observation de la topographie de surface, ce qui implique une marge d'incertitude notable. Ce chenal semble aujourd'hui comblé à 98%.

En surface (1 à 2 m de profondeur), l'analyse des logs sédimentaires a révélé des granulométries relativement fines (classes granulométriques 1 et 2) et la présence systématique de faciès limoneux de type Fr, caractéristique des dépôts de plaine alluviale, affectés par des processus pédogéniques post-dépositionnels. En dessous, une organisation stratigraphique plus complexe a généralement été observée, marquée par des alternances entre des faciès sableux (Sm et Sh) et des faciès fins (Fm et Fl). Ce modèle stratigraphique a été interprété comme l'enregistrement de variations du débit, liées à des phases régulières de reconnexion des bras-morts ou à des apports par débordement du chenal actif. Cette phase de remplissage a principalement été observée dans le chenal GRE, au fond duquel

d'épaisses séquences sableuses ont été perdues, ainsi que dans les chenaux STRO et OND. Elle est moins marquée sur le site SESC, où le faciès Fr prédomine.

La datation de deux fragments de bois prélevés à la base de la carotte GRE.5 (à environ 1 m au dessus du fond) a permis d'attribuer le chenal GRE (ou du moins sa déconnexion) au XIII^e siècle. Ces éléments de datation confirment ainsi la pertinence de l'indice toponymique sur lequel a reposé la sélection du site d'étude. Cette date a permis d'estimer une vitesse de sédimentation de 0,47 cm/an, qui s'avère nettement inférieure aux vitesses estimées pour les chenaux SESC (1,24 cm/an) et OND (1,05 cm/an).

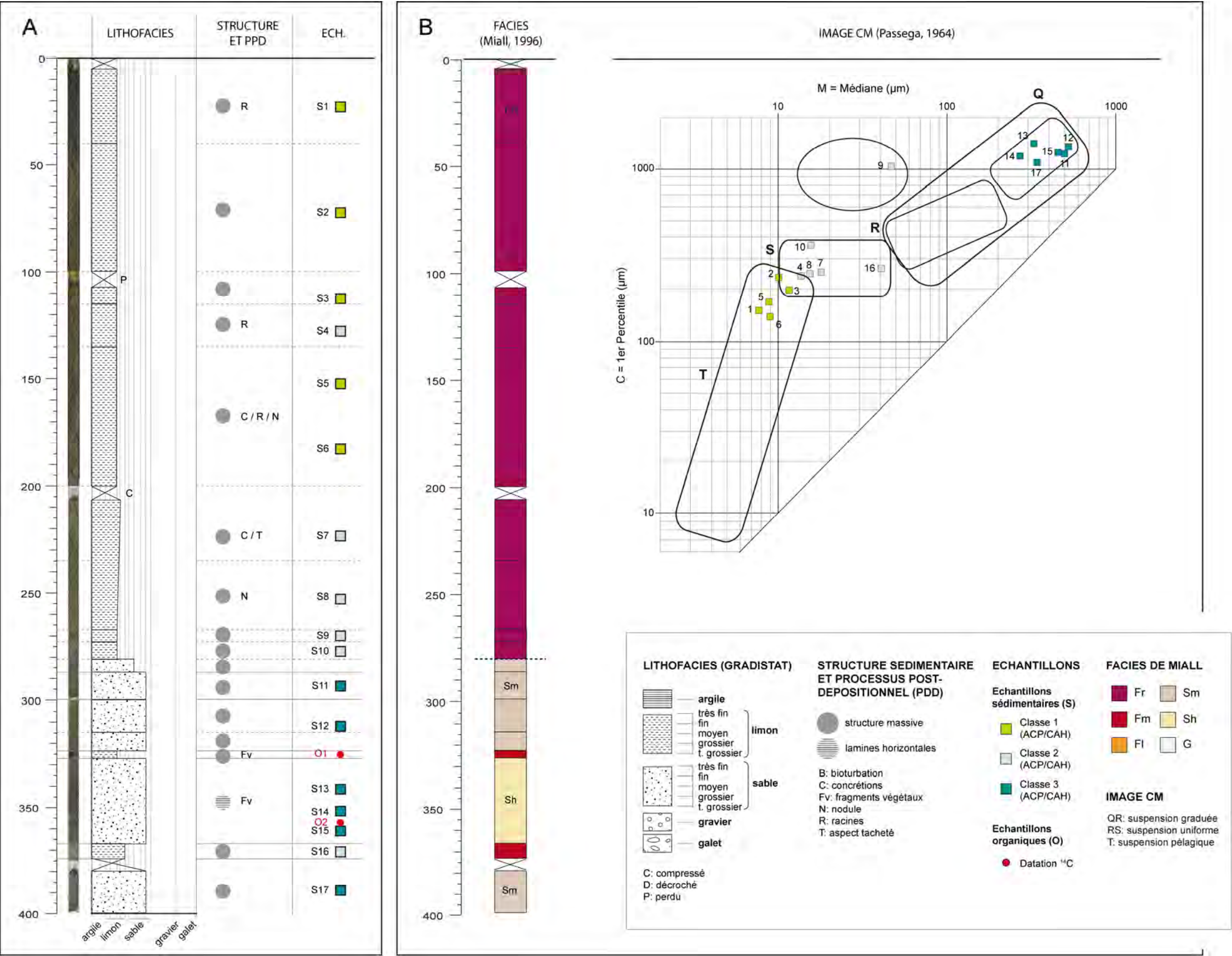


Figure 8.6 : Log sédimentaire de la carotte GRE.5. A - Eléments de description. B - Eléments d'interprétation.

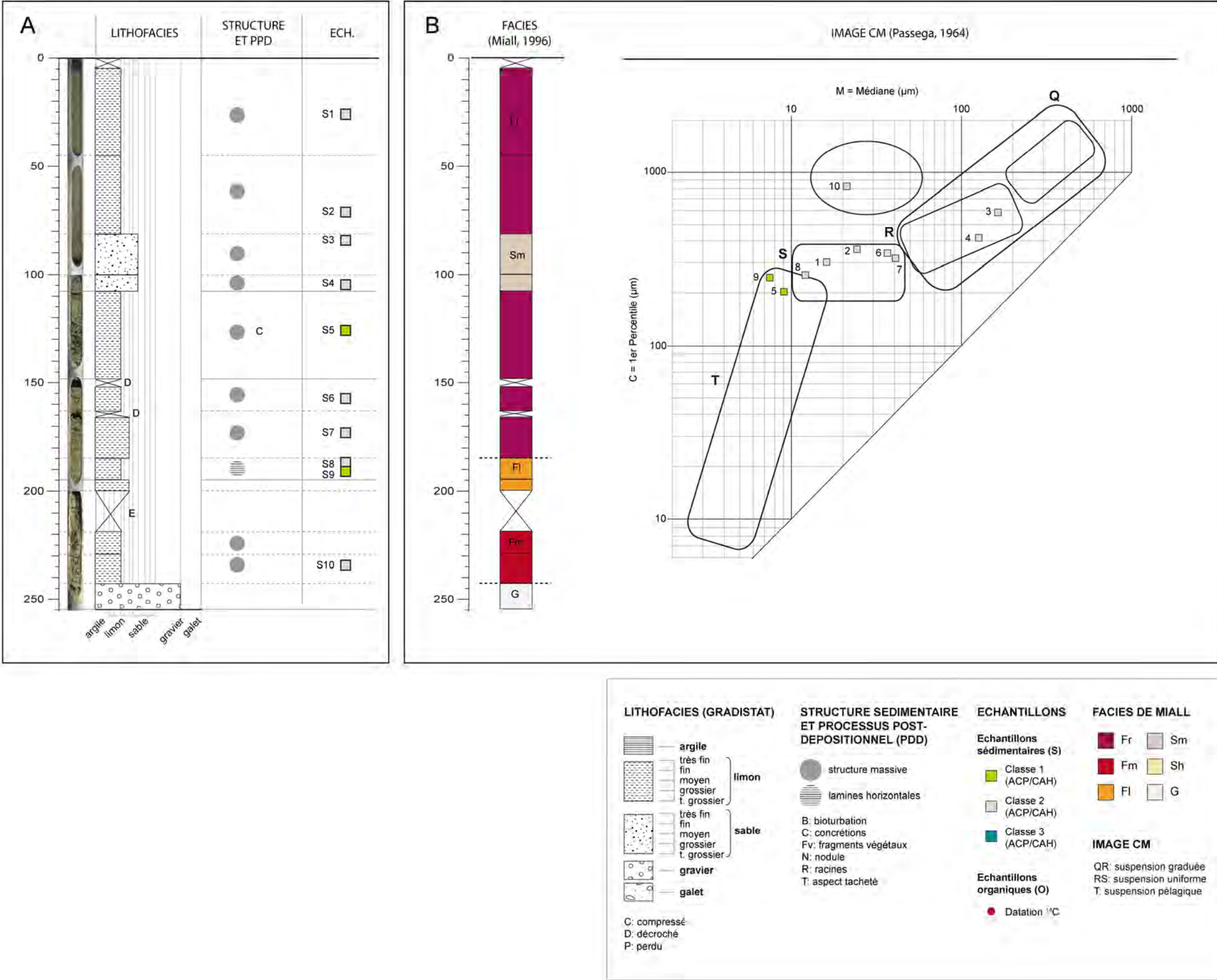


Figure 8.7 : Log sédimentaire de la carotte SESC.2. A - Eléments de description. B - Eléments d'interprétation.

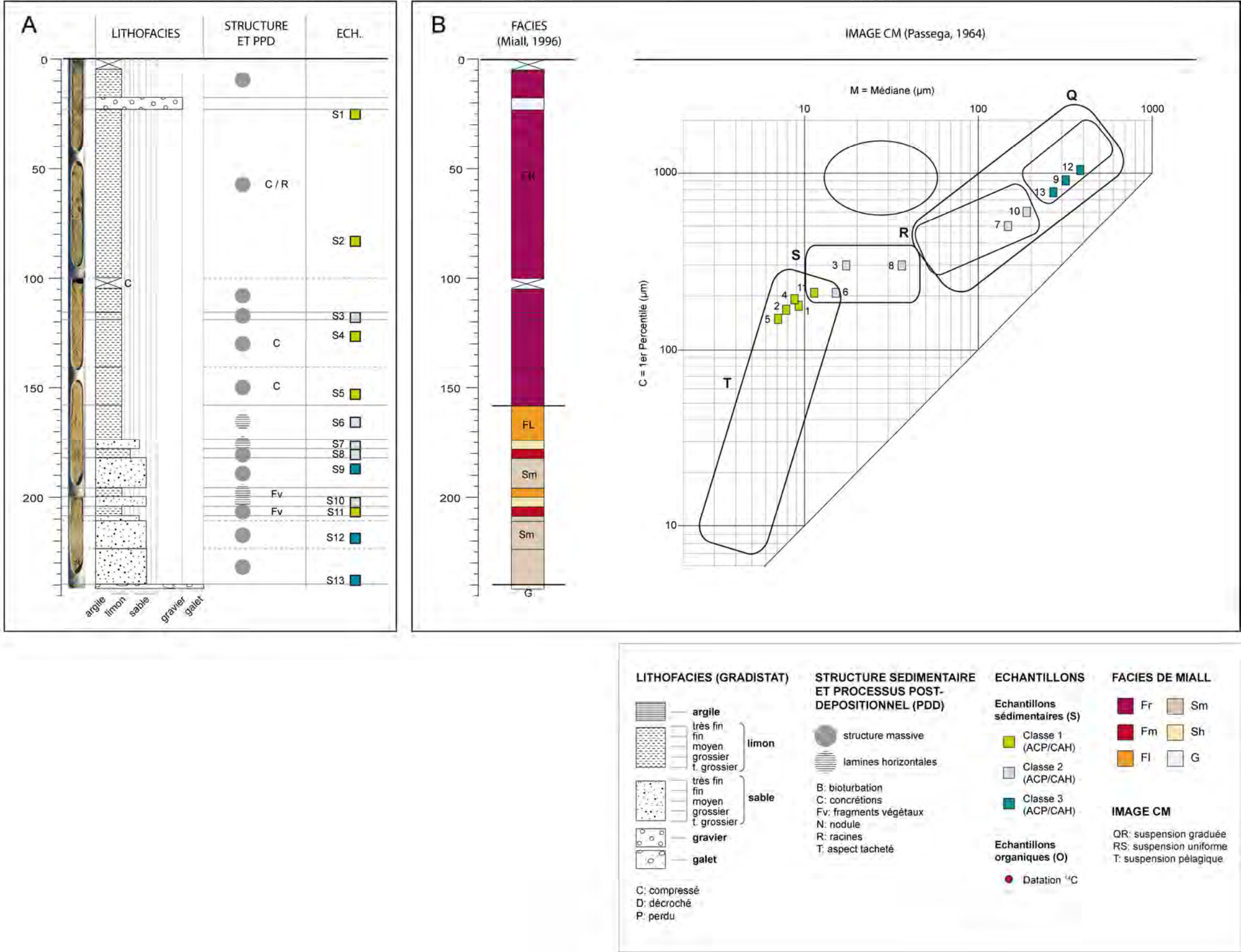


Figure 8.8 : Log sédimentaire de la carotte STRO.1. A - Eléments de description. B - Eléments d'interprétation.

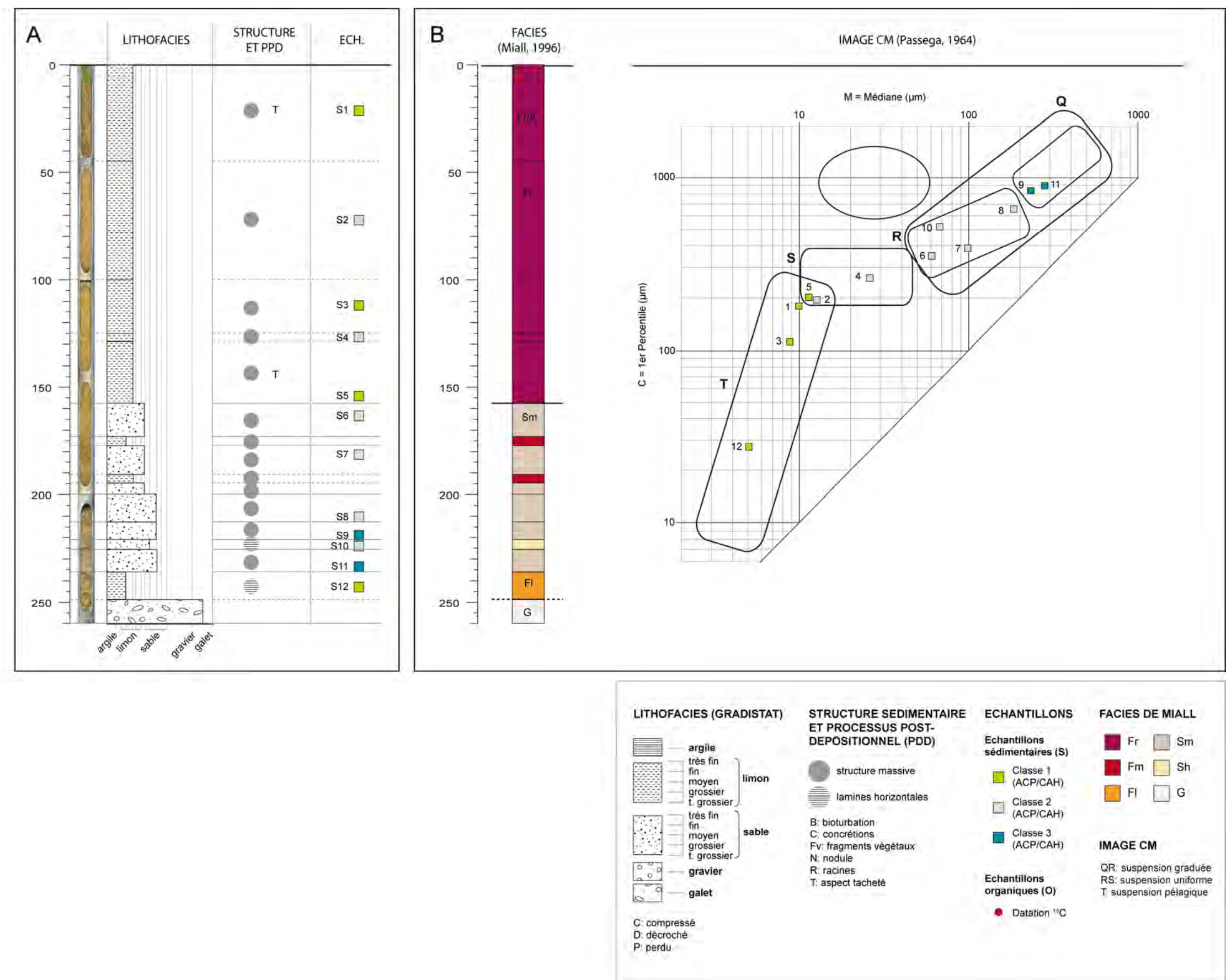


Figure 8.9 : Log sédimentaire de la carotte OND.1. A - Eléments de description. B - Eléments d'interprétation.

8.2. Caractérisation des paléochenaux du secteur de Verdun-sur-Garonne/ Dieupentale

Dans le secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale, trois sites ont été sondés (PLUM, MAG et JUL), pour lesquels aucun élément de datation n'était connu *a priori*.

8.2.1. Analyse de la topographie de surface du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale sur modèle numérique de terrain (MNT) haute résolution (1 m)

Dans le secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale, la topographie des sites sondés est globalement peu contrastée (Figs. 8.10 et 8.11).

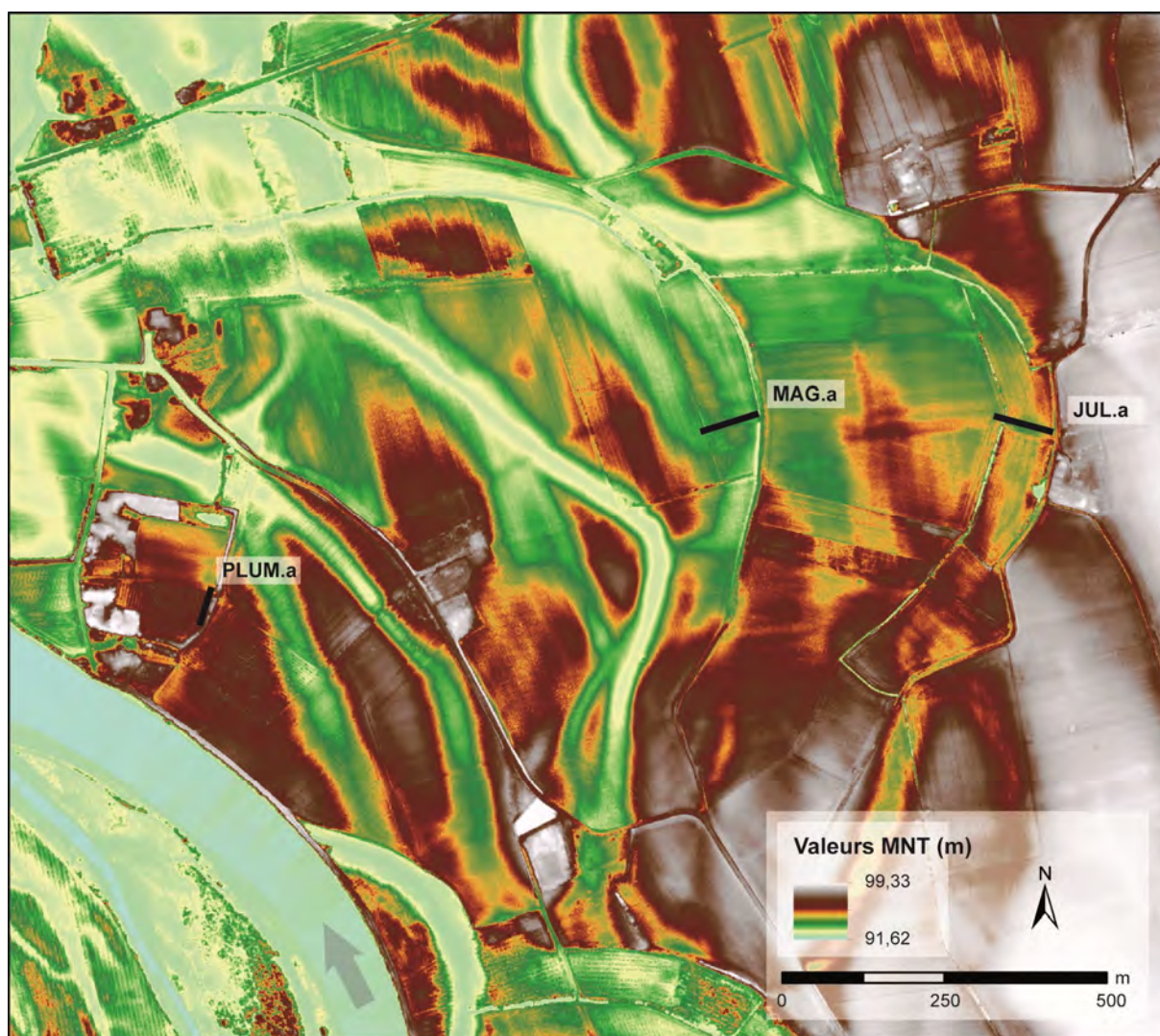


Figure 8.10 : MNT haute résolution (1 m) du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale (Source : IGN)

Le site PLUM a été sélectionné sur reconnaissance d'une forme convexe dans le parcellaire. Toutefois, l'analyse de la topographie ne permet pas d'identifier la forme ciblée dans le relief (Figs. 8.10 et 8.11). Deux chenaux encore bien inscrits dans le paysage sont en revanche visibles à proximité du site (Fig. 8.10).

Au niveau du site MAG, le MNT confirme la présence d'un ancien méandre et révèle une forme bombée semblable à une île, légèrement au nord du site de sondage (Fig. 8.10). Au regard du MNT et du profil topographique, il est possible d'envisager que la section de prospection électrique ne couvre que partiellement le paléochenal ciblé, qui dans ce cas mesurerait 147 m de largeur (Fig. 8.11).

Sur le site JUL, une rupture de pente délimite nettement la berge concave du méandre (Figs. 8.10 et 8.11). Toutefois, la berge convexe est mieux inscrite dans le parcellaire que dans le relief, qui semble influencé par les cultures et notamment par la présence d'un canal d'irrigation (Fig. 8.11). Il est de ce fait difficile d'évaluer la représentativité de la section de prospection électrique.

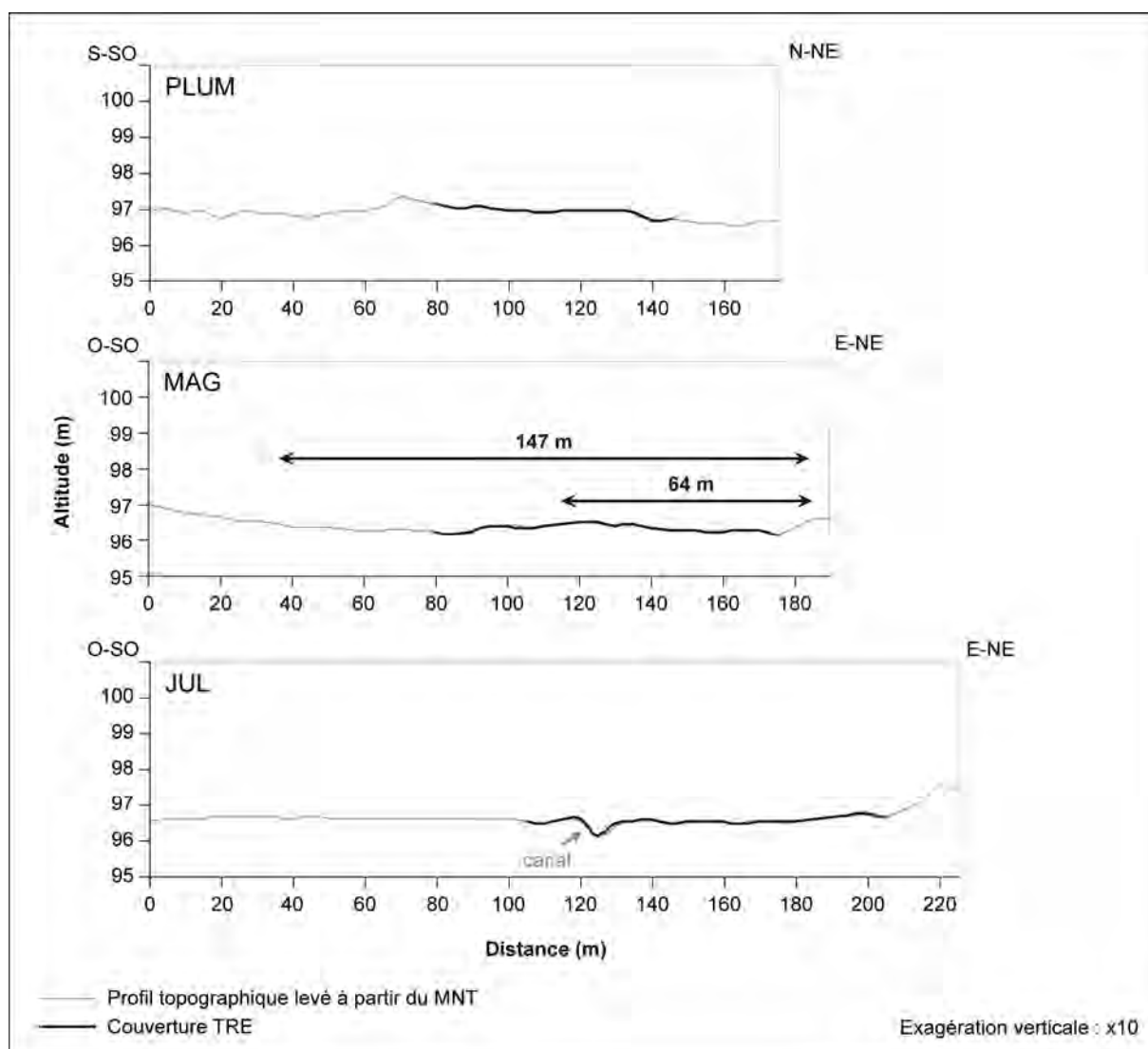


Figure 8.11 : Profils topographiques levés sur les sites PLUM, MAG et JUL. Les dépressions susceptibles de correspondre à des paléochenaux sont délimitées par une double flèche.

8.2.2. Analyse et interprétation de la géométrie du sous-sol dans le secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale à partir des tomographies de résistivité électrique (TRE)

8.2.2.1. Identification des paléochenaux sur les TRE

Les informations concernant les TRE levées sur les sites du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale sont synthétisées dans la table 8.5. Les sections en elles-mêmes sont présentées sur les figures 8.12 et 8.13.

| Site | Section TRE | Larg. dép. (m) | Long. TRE (m) | Déniv. TRE (m) | Ecart élec. (m) | Prof. max. (m) | Résist. min. (/m) | Résist. max. (/m) | Etendue (/m) |
|------|-------------|----------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|--------------------|--------------------|---------------|
| PLUM | PLUM.a | - | 63 | 0,41 | 1 | 7 | 25 | 1267 | 1242 |
| MAG | MAG.a | 147 | 94 | 0,28 | 2 | 11 | 12 | 104 | 92 |
| JUL | JUL.a | - | 94 | 1,51 | 2 | 11 | 8 | 113 | 105 |

Table 8.5 : Données concernant les TRE du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale. Largeur de la dépression topographique identifiée sur le MNT ; longueur de la section de prospection électrique ; dénivelé de la section de prospection électrique ; écartement entre les électrodes ; profondeur maximale de mesure ; valeur minimale de résistivité électrique ; valeur maximale de résistivité électrique ; étendue des valeurs de résistivité électrique.

Sur le site PLUM, la TRE PLUM.a (63 m de longueur et 7 m de profondeur) présente des valeurs de résistivité électrique fortes et contrastées, comprises entre 25 et 1267 /m (Fig. 8.12). Un corps particulièrement résistant (> 66 /m) est visible en profondeur. Un corps plus conducteur (< 66 /m) occupe les deux premiers mètres en surface. Toutefois, aucune forme dépressionnaire ne permet d'attester la présence d'un paléochenal.

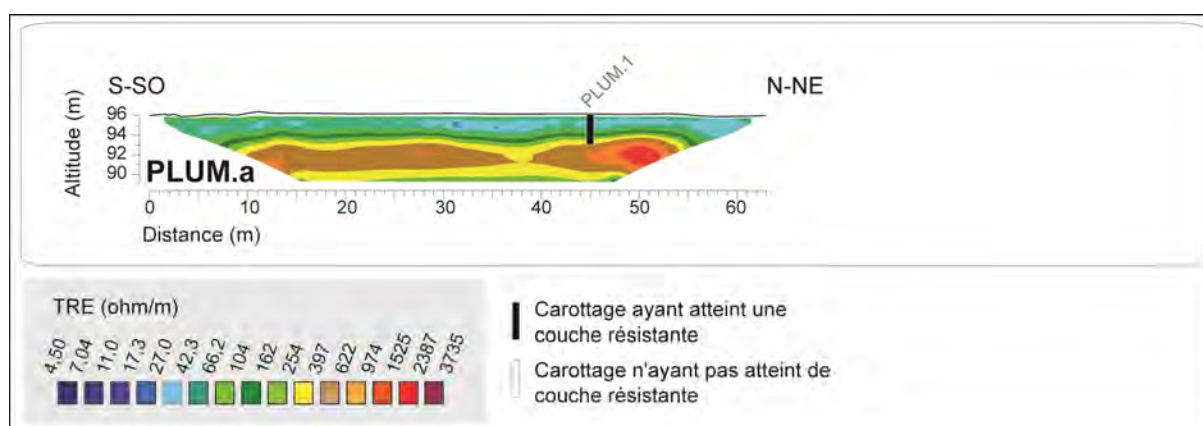


Figure 8.12 : TRE levée sur le site PLUM.

La TRE levée sur le site MAG (94 m de longueur et 11 m de profondeur) présente des valeurs de résistivité plus faibles et peu contrastées, comprises entre 12 et 104 /m, susceptibles de dépendre d'une forte teneur en eau (sol très humide à la date de mesure). Un niveau relativement résistant (valeurs comprises entre 27 et 104 /m) est visible sur toute la largeur de la section, en dessous de 3 m de profondeur. La partie supérieure de la section présente des valeurs de résistivité plus faibles (< 27 /m), susceptibles de correspondre au remplissage du paléochenal identifié sur ce site (Fig. 8.13).

La TRE levée sur le site JUL (94 m de longueur et 11 m de profondeur) présente des similitudes avec la précédente. Ici encore, les valeurs de résistivité sont faibles et très peu contrastées, allant de 8 à 113 Ω /m. Deux corps distincts relativement résistants (de 27 à 113 Ω /m) apparaissent en profondeur (Fig. 8.13). Un niveau plus conducteur ($< 27 \Omega$ /m), susceptible de correspondre au remplissage du paléochenal ciblé, est visible sur les deux premiers mètres. Ce niveau forme une dépression plus profonde à l'extrémité E-SE de la section, susceptible de correspondre à une mouille.

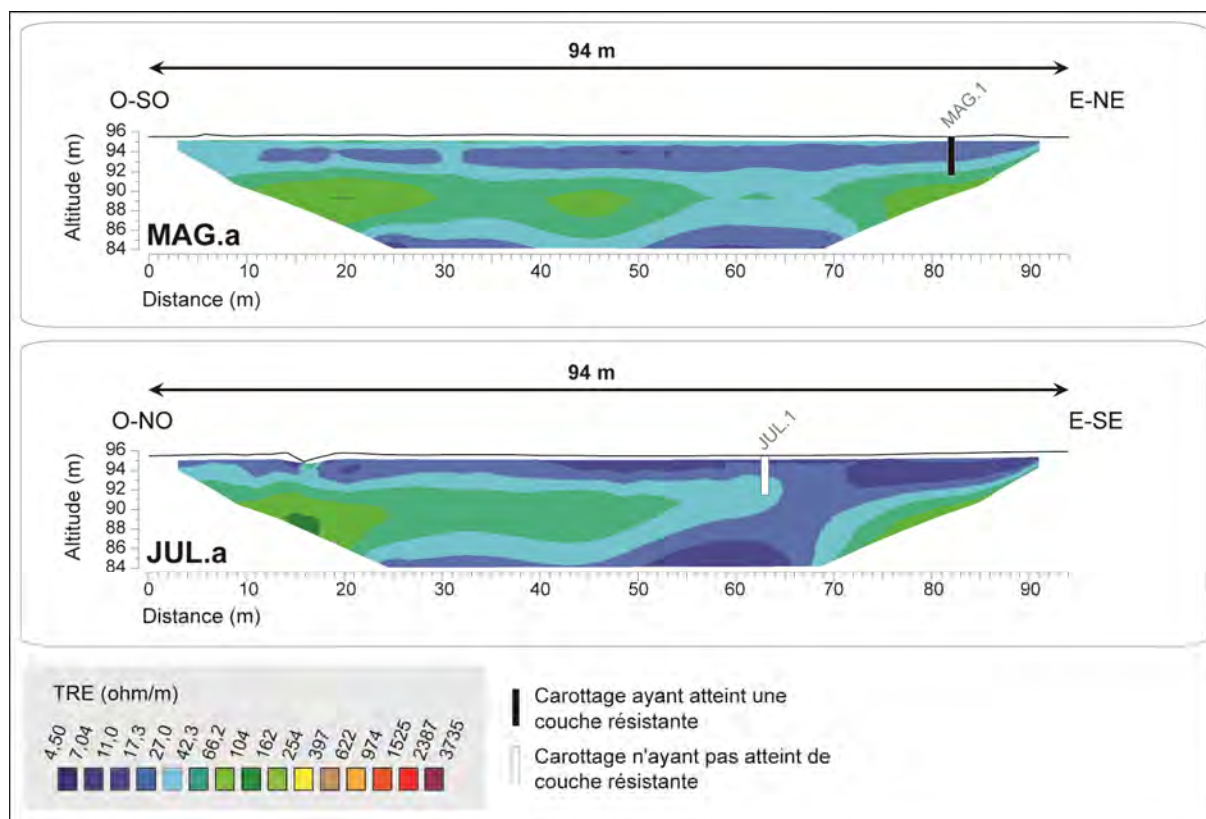


Figure 8.13 : TRE levées sur les sites MAG et JUL. Les dépressions susceptibles de correspondre à des paléochenaux sont délimitées par une double flèche.

8.2.2.2. Délimitation des sections mouillées à plein bord et interprétation en termes de paléohydraulique, stade de comblement et vitesse de sédimentation

Les sections mouillées à plein bord délimitées sur les TRE du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale sont présentées sur la figure 8.14. Les informations concernant le calcul des indices paléohydrauliques et stades de comblement sont synthétisées dans la table 8.6. Les profondeurs atteintes par les carottages, utiles à la délimitation des sections mouillées, sont listées plus loin, dans la table 8.7.

Sur le site PLUM, le carottage effectué a butté sur un niveau résistant à 2,95 m de profondeur (Table 8.7), qui coïncide avec une valeur forte de résistivité électrique sur la TRE PLUM.a ($\sim 397 \Omega$ /m - Fig. 8.12). Toutefois, ni la topographie révélée par le MNT haute résolution (Figs. 8.10 et 8.11), ni l'image du sous-sol fournie par la TRE (Fig. 8.12), ne permettent d'identifier une zone dépressionnaire susceptible de correspondre à un paléochenal. Aucune délimitation de section mouillée à plein bord n'est donc proposée pour ce site.

| Site | S (m ²) | P (m ²) | Q (m ³ /s) | L (m) | (w/m ²) | Sr (m ²) | SC (%) | Er (m) | t ₀ | VS (cm/an) |
|------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-------|---------------------|----------------------|--------|--------|----------------|------------|
| PLUM | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| MAG (scénario 1) | 260 | 131 | 431 | 64 | 60 | 254 | 98 | 4,08 | - | - |
| MAG (scénario 2) | 568 | 299 | 915 | 147 | 55 | - | - | - | - | - |
| JUL | 351 | 175 | 586 | 86 | 60 | 338 | 96 | 4,09 | - | - |

Table 8.6 : Indices paléohydrauliques et stades de comblement calculés sur les paléochenaux du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale. Aire de la section mouillée à plein bord (S) ; périmètre de la section mouillée à plein bord (P) ; débit à plein bord (Q) ; largeur à plein bord (L) ; puissance spécifique () ; aire de la section mouillée occupée par le remplissage sédimentaire (Sr) ; stade de comblement (SC) ; épaisseur moyenne du remplissage (Er) ; date estimée de la déconnexion du bras (t₀) ; vitesse de sédimentation (VS). La valeur de pente utilisée pour calculer les paléodébites à plein bord dans le secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale est 0,0009 m/m (Source : IGN, PROFILS). Aucun élément de datation n'étant connu dans ce secteur, les vitesses de sédimentation n'ont pas pu être estimées à ce stade de l'analyse (estimations possibles à partir de datations radiocarbone - cf. 8.2.3.2 et 8.2.3.3).

Sur le site MAG, le carottage effectué à l'extrémité E-NE du site a atteint un niveau résistant à 3,80 m de profondeur (Fig. 8.14 et Table 8.7). Ce niveau correspond à une valeur de résistivité électrique de 42 Ω /m sur la TRE MAG.a. Le fond du chenal a donc été délimité en suivant cette ligne de valeur. Sur ce site, l'analyse du MNT a mis en évidence une grande dépression (147 m de largeur), peu incisée et divisée en deux par une forme bombée (Figs. 8.10 et 8.11). La section de prospection électrique ne couvre que partiellement cette zone. Deux scénarii ont donc été envisagés pour délimiter la section mouillée à plein bord. En supposant que la dépression ciblée par les sondages électriques corresponde au paléochenal et que son prolongement vers l'ouest ne soit qu'un chemin d'eau relativement récent (scénario 1), une largeur à plein bord de 64 m a d'abord été retenue. La section mouillée à plein bord obtenue (260 m² - Table 8.6 et Fig. 8.14) permet d'estimer un paléodébit à plein bord de 431 m³/s et une puissance spécifique de 60 w/m². Le remplissage sédimentaire occupe 98% de cette section mouillée. Le second scénario envisage un chenal large de 147 m, divisé en deux bras par un banc central. La section mouillée à plein bord correspondant a été délimitée en prolongeant le fond visible sur la TRE et en supposant un réenfoncement vers l'ouest (Fig. 8.14). Cette section (568 m²), permet d'estimer un débit à plein bord de 915 m³/s et une puissance spécifique de 55 w/m² (Table 8.6). Bien que sa profondeur soit partiellement hypothétique, cette section semble cohérente du fait qu'aucune rupture révélant la présence d'une berge convexe n'est visible sur la TRE MAG.a.

Sur le site JUL, le carottage effectué n'a pas atteint la grave (perte de niveaux sableux meubles en profondeur - Fig. 8.14 et Table 8.7). Toutefois, étant donné les similitudes et la proximité géographique entre les TRE JUL.a et MAG.a, les valeurs de résistivité électrique de ces deux sections sont susceptibles d'être représentatives des mêmes types de corps sédimentaire. Comme pour le site MAG, le fond du paléochenal a donc été délimité à partir de la ligne de valeur 42 Ω /m (Fig. 8.14). La fosse visible à l'extrémité E de la section est susceptible de correspondre à une mouille, peut-être incisée dans le fond molassique (la validation de ce scénario nécessitera de nouveaux forages plus profonds). La surface ainsi délimitée permet d'obtenir une section à plein bord de 351 m², à partir de laquelle un débit à plein bord de 586 m³/s et une puissance spécifique de 60 w/m² ont été estimés (Table 8.6). Le remplissage sédimentaire occupe 96% de cette section mouillée.

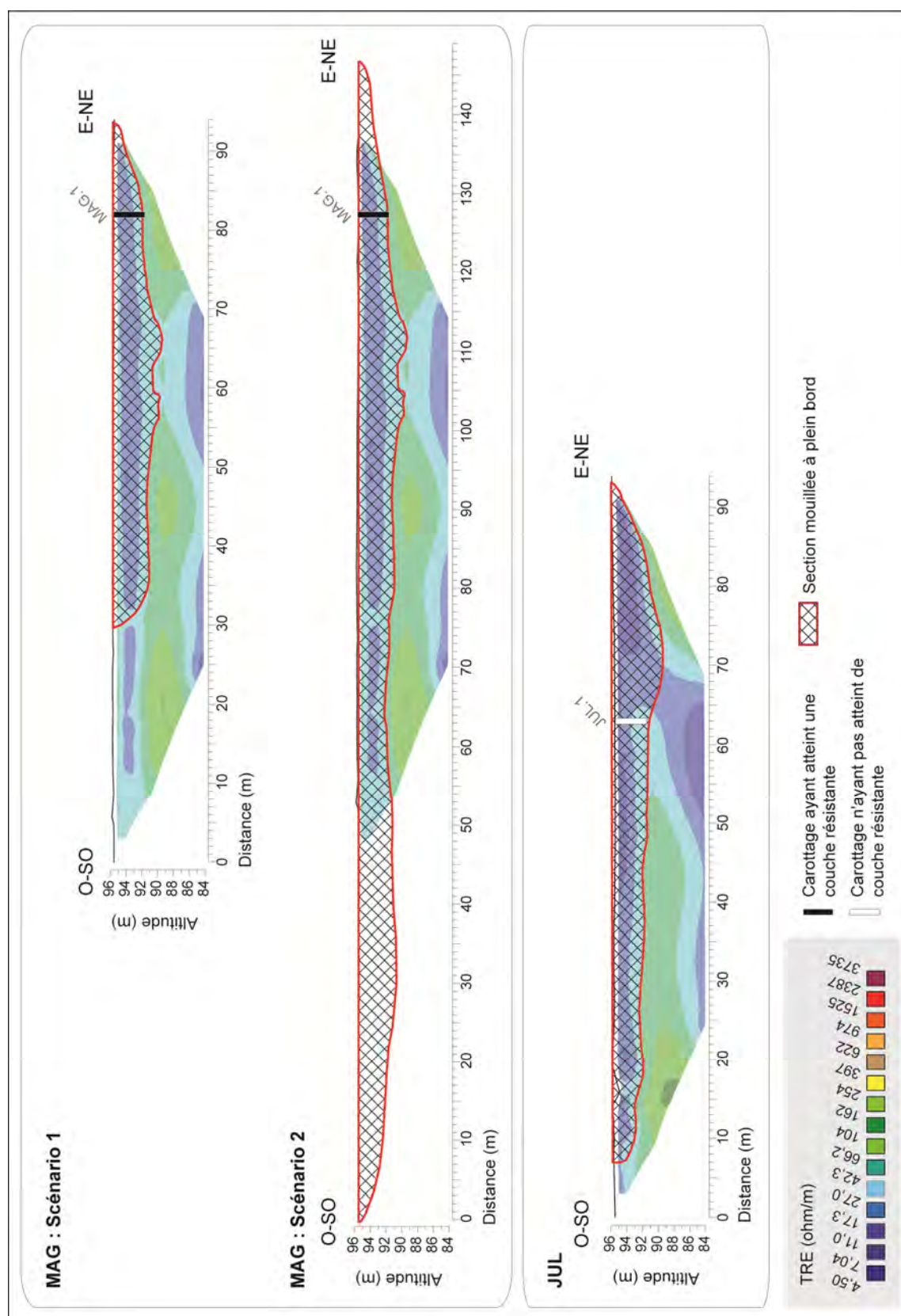


Figure 8.14 : Délimitation des sections mouillées à plein bord à partir des TRE levées sur les sites MAG et JUL.

8.2.3. Analyse du remplissage des paléochenaux du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale à partir des logs sédimentaires

Les informations concernant les carottages réalisés dans le secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale (type de gouge, longueur prélevée, longueur perdue et profondeur à laquelle la grave a été atteinte) sont synthétisées dans la table 8.7. Les logs représentant les carottes prélevées sur les sites PLUM, MAG et JUL sont présentés sur les figures 8.15 à 8.17. Les informations concernant les datations radiocarbone réalisées sur les éléments organiques prélevés dans ces carottes sont synthétisées dans la table 8.8.

| Site | Carotte | Gouge | Longueur prélevée (m) | Longueur perdue (m) | Profondeur de la grave (m) |
|------|---------|---------|-----------------------|---------------------|----------------------------|
| PLUM | PLUM.1 | ouverte | 3 | 0 | 2,95 |
| MAG | MAG.1 | ouverte | 4 | 0 | 3,80 |
| JUL | JUL.1 | ouverte | 3 | 1 | > 4 |

Table 8.7 : Informations concernant les carottages réalisés dans le secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale.

| ID échantillon | N° laboratoire | Matériel traité | Détermination | Age BP conventionnel | Datation cal. 2 sigma BP | Datation cal. 2 sigma AD | Vitesse de sédimentation (cm/an) |
|----------------|----------------|-----------------|---------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| MAG1-364 | Beta-384365 | bois | - | 990 ± 30 | 955 à 900 | 995 à 1050 | 0,37 |
| | | | | | 865 à 825 | 1085 à 1125 | 0,40 |
| | | | | | 810 à 800 | 1140 à 1150 | 0,42 |
| JUL1-273-276 | Beta-384364 | bois | - | 930 ± 30 | 925 à 785 | 1025 à 1165 | 0,30 |

Table 8.8 : Dates radiocarbone sur les sites MAG et JUL. Les identifiants (ID) des échantillons datés correspondent au nom de la carotte, suivie de la profondeur de prélèvement en cm.

8.2.3.1. Du log à l'interprétation des processus et environnements de dépôt : la carotte PLUM.1

Sur le site PLUM, aucune forme dépressionnaire susceptible de correspondre à un paléochenal n'a été observée dans la topographie ou sur les images du sous-sol (TRE - Fig. 8.12).

La carotte PLUM.1 (3 m de longueur - Table 8.7 et Fig. 8.15-A) présente des niveaux limoneux massifs et racinaires jusqu'à 2,14 m de profondeur (faciès Fr - Miall, 1996). Les échantillons prélevés dans ces niveaux appartiennent à la classe granulométrique 2 sur le premier mètre (niveaux sablo-limoneux à limono-sableux, relativement peu chargés en carbone organique) et à la classe 1 sur le deuxième mètre (argiles à limons fins, chargés en matière organique et en carbonate). A partir de 2,14 m, des niveaux sableux (faciès Sm et Sh - Miall, 1996) alternent avec des niveaux à granulométrie plus fine (faciès FI - Miall, 1996), qui contiennent ponctuellement des fragments végétaux (trop fins pour datation radiocarbone). Les niveaux sont moins épais qu'en surface et sont souvent stratifiés (Sh). Les échantillons sédimentaires prélevés entre 2,14 et 2,80 m de profondeur appartiennent encore à la classe granulométrique 2, tandis que ceux prélevés à la base de la carotte (entre 2,80 et 2,95 m) présentent une granulométrie plus grossière, remarquée par leur

appartenance à la classe 3 (sables fins à grossiers, caractérisés par des teneurs très faibles en carbone organique et en carbonate). A 2,95 m, le carottage a butté sur un niveau de galet.

Comme observé dans le secteur de Grenade/Ondes, le log de synthèse et l'image CM (Fig. 8.15-B), révèlent ici une opposition entre deux environnements de dépôt distincts : 1) des dépôts caractéristiques des plaines alluviales sur les deux premiers mètres (faciès Fr), liés à des processus de décantation et suspension uniforme (jonction entre les segments T et RS de l'image CM) et repris par des processus pédogéniques et 2) des dépôts marqués par des variations de débit significatives avec une alternance entre des apports grossiers de crue rapide (faciès Sm et Sh ; segments QR et RS de l'image CM) et des apports fins d'eau quasi-stagnante (faciès Fm ; segment RS de l'image CM). Etant donné la faiblesse des informations concernant le contexte paléoenvironnemental de dépôt (absence de chenal et de donnée chronologique), il est difficile de proposer une interprétation plus poussée de ces niveaux.

8.2.3.2. Du log à l'interprétation des processus et environnements de dépôt : la carotte MAG.1

Sur le site MAG, le carottage a été réalisé à l'extrémité E-NE du paléochenal identifié sur la TRE MAG.a (Fig. 8.14), légèrement en marge de la zone la plus profonde.

La carotte MAG.1 (4 m de longueur - Table 8.7 et Fig. 8.16-A) est essentiellement composée de niveaux limoneux massifs, à l'exception de deux niveaux sableux en profondeur. Jusqu'à 2,50 m, les niveaux observés contiennent des racines et/ou présentent un aspect tacheté (faciès Fr - Miall, 1996). Les échantillons prélevés dans ces niveaux appartiennent majoritairement à la classe granulométrique 1 (argiles à limons fins, relativement chargés en matière organique et en carbonate). A partir de 2,50 m, le sédiment devient plus humide. On observe d'abord un niveau sableux massif entre 2,50 et 3 m, en dessous duquel les dépôts redeviennent limoneux, se caractérisent par une épaisseur réduite et contiennent ponctuellement des fragments végétaux (faciès Fm - Miall, 1996). Les échantillons sédimentaires prélevés en dessous de 2,50 m appartiennent majoritairement à la classe granulométrique 2 (niveaux sablo-limoneux à limono-sableux, relativement peu chargés en carbone organique) et plus ponctuellement à la classe 1. A 3,70 m de profondeur, le carottage a de nouveau pénétré dans un niveau sableux, avant de buter sur un niveau de galets à matrice sableuse, dont la partie supérieure (20 cm) a pu être prélevée.

Le log de synthèse et l'image CM (Fig. 8.16-B) révèlent ici trois phases distinctes dans le comblement du chenal, avec : 1) des dépôts caractéristiques des plaines alluviales en surface (faciès Fr), principalement associés à un processus de décantation (partie haute du segment T de l'image CM) et repris par des processus pédogéniques ; 2) un apport massif par suspension graduée (partie basse du segment QR) entre 2,5 et 3 m de profondeur, susceptible de correspondre à un seul événement de crue (réouverture du bras-mort ou débordement de chenal actif dans la plaine) et 3) des apports successifs marqués par des débits variables en profondeur (segments QR, RS et T de l'image CM), là encore probablement dans un contexte de réouverture du bras-mort ou de débordement du chenal actif, en période de crue.

Un fragment de bois a été prélevé à la base de la carotte (3,64 m), dans un niveau de fine. Ce fragment a été attribué à la période comprise entre 995 et 1150 cal. AD (2 sigma) par datation radiocarbone (Table 8.8). Pour des raisons logistiques, il n'a pas pu faire l'objet d'une détermination. Il s'agit toutefois d'une brindille, ce qui laisse penser que la date obtenue est proche de la date réelle du niveau dans lequel le fragment a été prélevé. Cette date permet donc de situer la phase de déconnexion du chenal au Moyen-Âge central (XI^e-

XII^e siècles). Une vitesse de sédimentation de l'ordre de 0,37-0,42 cm/an a ainsi pu être estimée.

8.2.3.3. Du log à l'interprétation des processus et environnements de dépôt : la carotte JUL.1

Sur le site JUL, le carottage a été effectué dans la partie centrale du paléochenal ciblé, dans une zone relativement profonde (Fig. 8.14). La carotte JUL.1 (3 m de longueur - Table 8.7) est donc probablement bien représentative des niveaux de remplissage.

Cette carotte (Fig. 8.17-A) présente d'épais niveaux limoneux massifs et racinaires/tachetés (faciès Fr - Miall, 1996) jusqu'à 1,40 m de profondeur. Les échantillons sédimentaires prélevés dans ces niveaux appartiennent à la classe granulométrique 1 (argiles à limons fins, relativement chargés en matière organique et en carbonates). À partir de 1,40 m, les niveaux deviennent moins épais, plus hétérogènes et pour certains, chargés en fragments végétaux. La majorité des échantillons sédimentaires prélevés dans ces niveaux appartiennent à la classe granulométrique 2 (niveaux sablo-limoneux à limono-sableux, moins chargés en carbone organique). Un échantillon prélevé à 2,55 m de profondeur fait toutefois exception en se positionnant dans la classe 3 (sables fins à grossiers, caractérisés par des teneurs très faibles en carbone organique et en carbonate). En dessous de 3 m de profondeur, le carottier a continué à pénétrer dans les niveaux de remplissage, sans que les sédiments ne puissent être remontés, ce qui révèle la présence de matériaux meubles en profondeur (probablement des sables grossiers).

Le log de synthèse, associé à la projection des valeurs granulométriques sur l'image CM (Fig. 8.17-B), révèle ici encore la présence de dépôts caractéristiques des plaines alluviales en surface (transformation post-dépositionnelle par les processus de pédogenèse), associés à un processus de décantation (segment T de l'image CM). En dessous de 1,40 m, le log de synthèse révèle des alternances de débit, avec des alternances de niveaux attribués à des processus variés (segments QR et RS de l'image CM). Cette phase est susceptible de correspondre à une phase de reconnexion régulière du bras-mort ou d'apports par débordement du chenal actif.

Un fragment de bois a été prélevé à 2,76 m de profondeur dans la carotte JUL.1, soit à plus d'1 m au dessus du fond. Ce fragment a été daté à 1025-1165 cal. AD (2 sigma) par datation radiocarbone (Table 8.8 et Fig. 8.17-A). Là encore, la détermination spécifique n'a pas pu être effectuée (raisons logistiques). Toutefois la morphologie du fragment (brindille) laisse penser que la date obtenue est proche de la date réelle du niveau dans lequel le fragment a été prélevé. Cette date a permis d'estimer une vitesse de sédimentation de l'ordre de 0,30 cm/an.

8.2.4. Synthèse des informations recensées dans le secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale

Trois sites ont été sondés dans le secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale : PLUM, MAG et JUL. Chacun de ces sites a été ciblé sur observation de formes convexes dans le parcellaire, supposées antérieures à la période couverte par les cartes historiques (1750-2000). Sur le site PLUM, les données de terrain n'ont pas permis de confirmer la présence d'un paléochenal. Sur les sites MAG et JUL, plusieurs éléments topographiques, géophysiques et sédimentaires ont suggéré la présence de paléochenaux. Toutefois, la géométrie des chenaux a été globalement plus difficile à appréhender que dans le secteur

de Grenade/Ondes, en raison de valeurs de résistivité électrique faibles et d'une topographie peu contrastée.

Sur le site MAG, le MNT a révélé une grande dépression très peu incisée, divisée en deux par un bombement central. Les sondages électriques n'ont porté que sur la moitié est de cette dépression, délimitée par une berge concave bien visible sur le terrain. Deux scénarii ont donc été envisagés. Le premier scénario s'en tient à la zone de sondage. Il envisage ainsi un paléochenal large de 64 m, comblé à 98%, qui présente une section mouillée à plein bord de 260 m², à partir de laquelle un débit à plein bord de 431 m³/s et une puissance spécifique de 60 w/m² ont été estimés. Le second scénario privilégie l'indice topographique. Il envisage ainsi un paléochenal large de 147 m, pour lequel une section mouillée à plein bord de 568 m² a été délimitée arbitrairement par prolongement de la section définie dans le scénario 1. Sur cette base, un débit à plein bord de 915 m³/s et une puissance spécifique de 55 w/m² ont été estimés. Sur le site JUL, la délimitation de la berge convexe est là aussi relativement floue mais un seul scénario est envisageable. Le paléochenal ciblé semble ici comblé à 96%. Il présente une largeur de 86 m et se caractérise par un paléodébit à plein bord estimé de 586 m³/s et une puissance spécifique de 60 w/m².

Comme dans le secteur de Grenade/Ondes, l'analyse des logs a révélé en surface (1,5 à 2,5 m de profondeur) des granulométries relativement fines (classes granulométriques 1 et 2) et la présence systématique de faciès limoneux de type Fr, caractéristiques des dépôts de plaine alluviale (transformation post-dépositionnelle des dépôts par les processus pédogéniques). En profondeur, des alternances entre faciès sableux (Sm et Sh) et faciès fins (Fm et Fl), liées à des variations du débit, ont à nouveau été observées. Toutefois, contrairement au modèle observé dans le secteur de Grenade/Ondes, dans les chenaux MAG et JUL, des faciès fins et massifs (Fm) dominant par rapport aux niveaux sableux, ce qui traduit un hydrodynamisme moins intense ou une moindre disponibilité en charge alluviale grossière. En opposition, au niveau du site PLUM, une organisation stratigraphique plus comparable au modèle observé dans le secteur de Grenade/Ondes a été retrouvée, alors que la zone sondée ne semble pas correspondre à un paléochenal.

La datation radiocarbone d'un fragment de bois prélevé à la base de la carotte MAG.1 a permis d'attribuer le chenal MAG (ou du moins sa déconnexion) à la période comprise entre la fin du X^e siècle et le début du XII^e siècle. Sur le site JUL, un fragment de bois a aussi été attribué aux XI^e-XII^e siècles par datation radiocarbone, toutefois le prélèvement a été effectué plus de 1 m au dessus du fond. Ces différentes dates ont permis d'estimer des vitesses de sédimentation de l'ordre de 0,30 cm/an (JUL) et 0,37-0,42 cm/an (MAG).

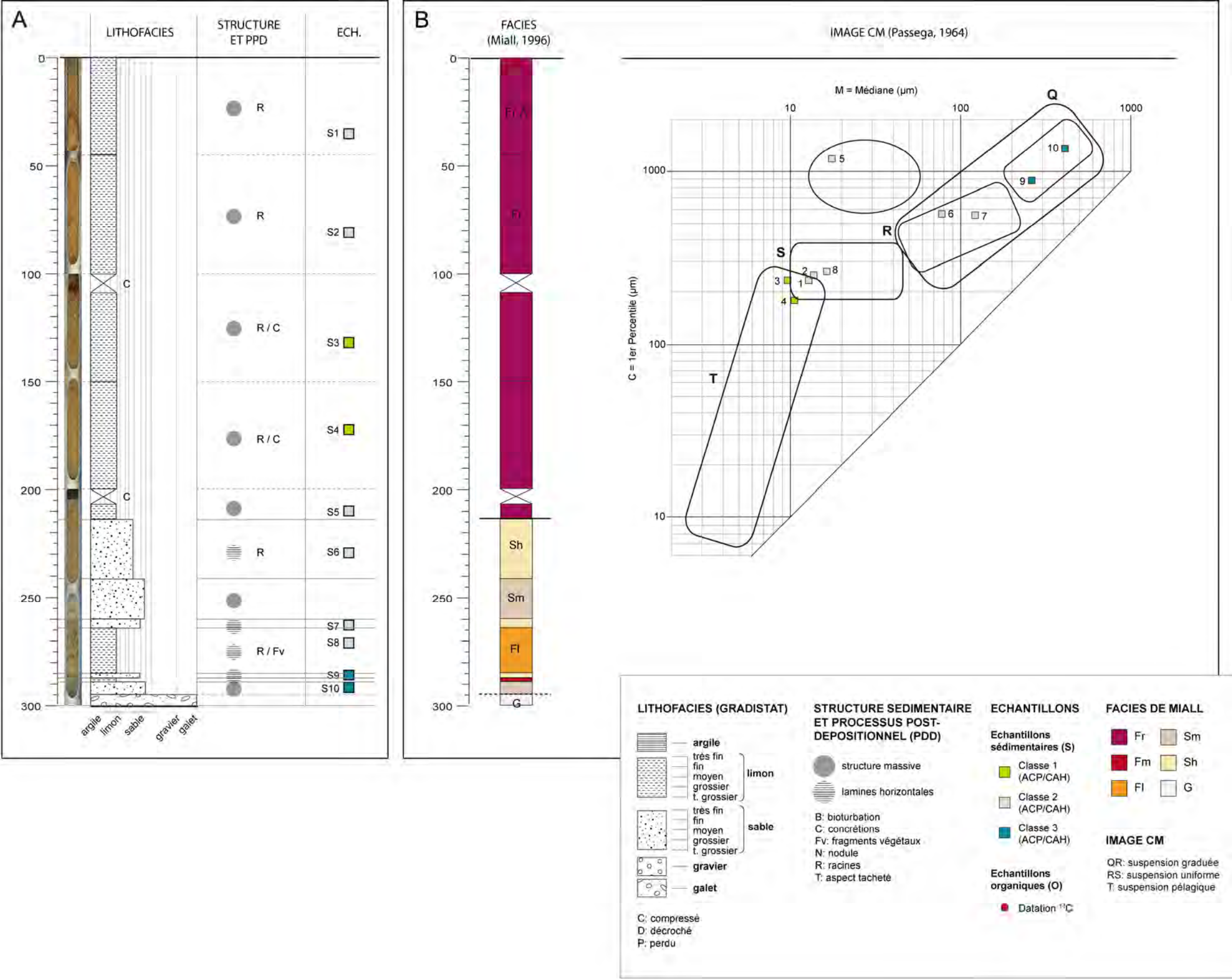


Figure 8.15 : Log sédimentaire de la carotte PLUM.1. A - Eléments de description. B - Eléments d'interprétation.

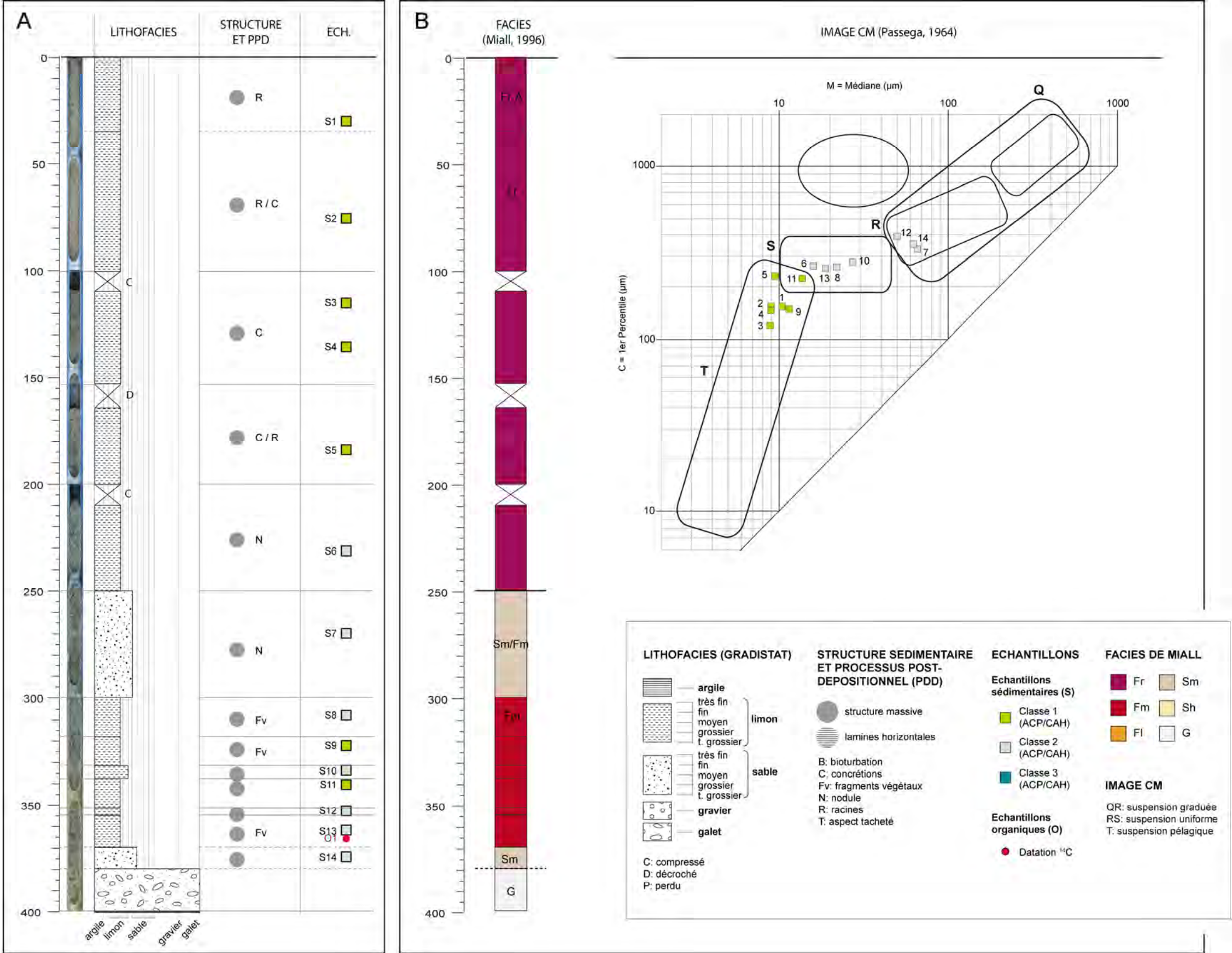


Figure 8.16 : Log sédimentaire de la carotte MAG.1. A - Eléments de description. B - Eléments d'interprétation.

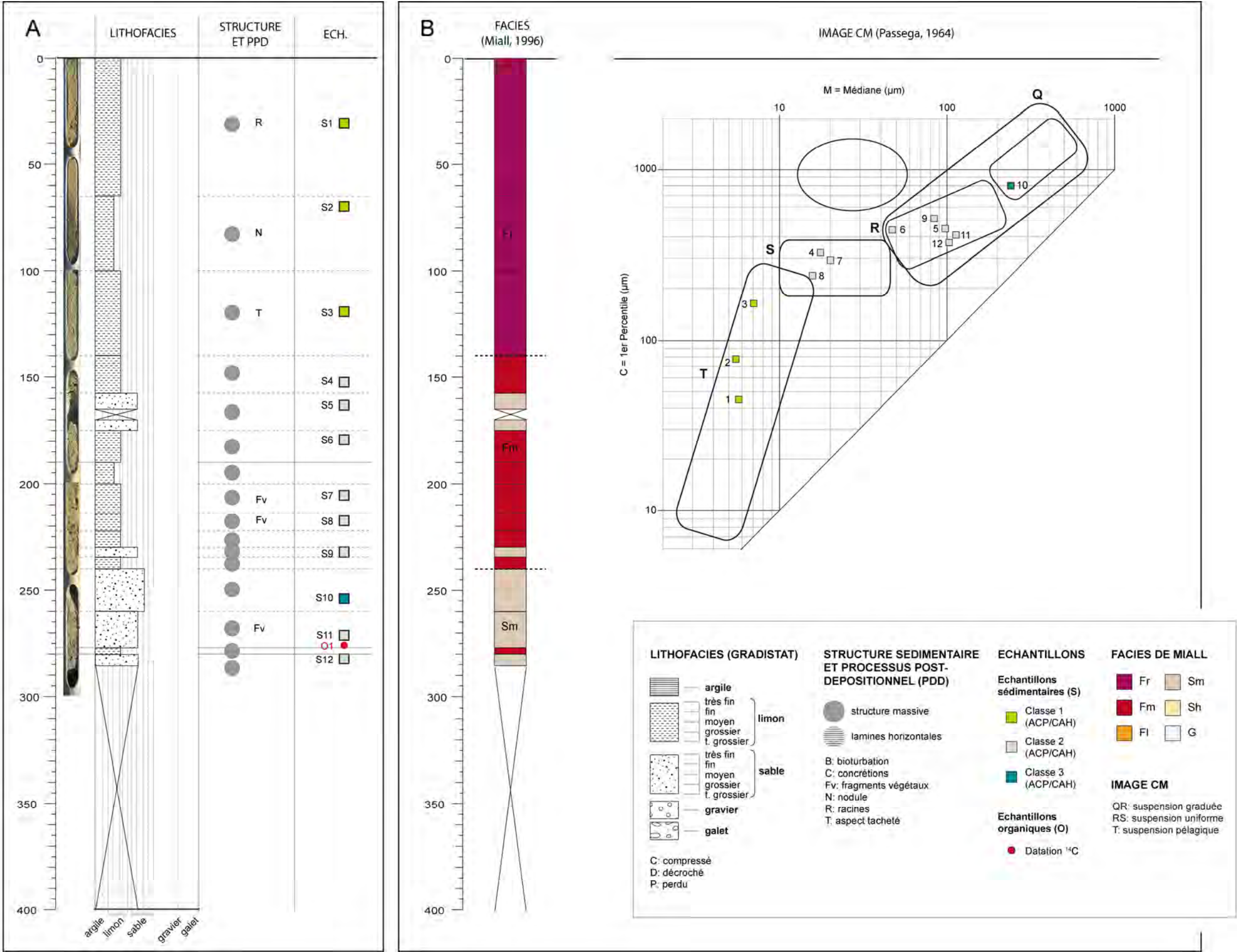


Figure 8.17 : Log sédimentaire de la carotte JUL.1. A - Eléments de description. B - Eléments d'interprétation.

8.3. Caractérisation des paléochenaux du secteur de Cordes-Tolosannes/ Saint-Porquier

Dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier, quatre sites ont été sondés (numérotés par ordre chronologique de sondage) : CORD2 et CORD4 correspondent à des chenaux en phase de déconnexion sur la carte de 1868 ; CORD1 et CORD3 correspondent à des chenaux antérieurs à la période couverte par les cartes historiques (1750-2000), pour lesquels aucun élément de datation n'était connu *a priori*.

8.3.1. Analyse de la topographie de surface du secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier sur modèle numérique de terrain (MNT) haute résolution (1 m)

Les quatre paléochenaux sondés dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier, sont visibles sur le MNT (Figs. 8.18 à 8.20). Les deux formes les plus récentes et les plus proches du lit actuel de la Garonne (CORD2 et CORD4) sont toutefois nettement plus incisées que les paléochenaux ciblés sur les sites CORD1 et CORD3.

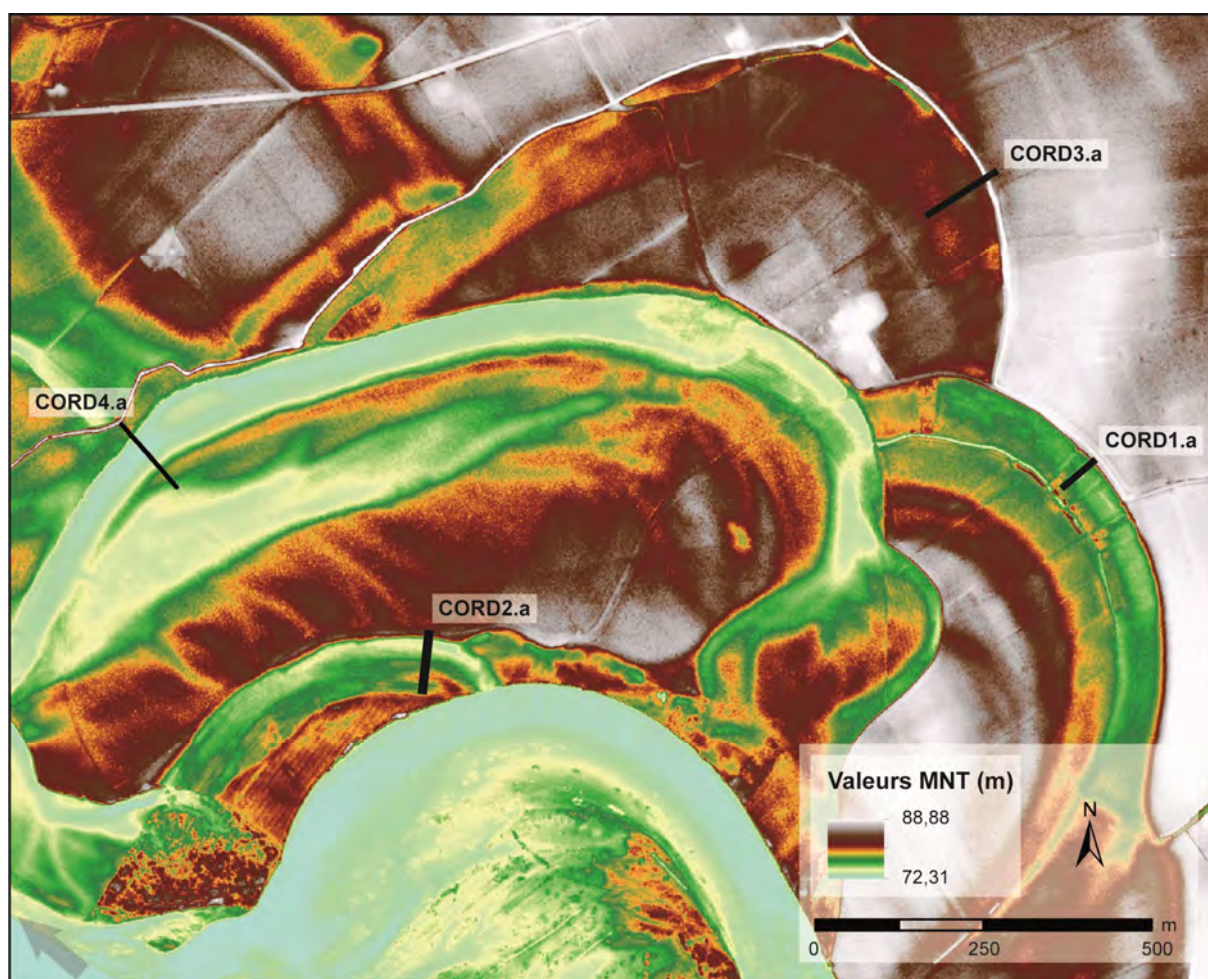


Figure 8.18 : MNT haute résolution (1 m) du secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier (Source : IGN)

Sur le site CORD1, la rive concave du paléochenal est bien délimitée et les empreintes des phases successives de la migration du méandre sont encore visibles sur le MNT (Figs. 8.18 et 8.19). Au regard du MNT et du profil topographique généré sous SIG au niveau de ce site, le paléochenal ciblé présente une largeur de 180 m environ. Toutefois, la topographie est localement perturbée par la présence d'un canal et d'une haie dense, qui donne l'impression d'une dépression plus réduite (Fig. 8.19). La délimitation des sections de prospection électrique ayant reposé sur des observations de terrain (MNT acquis à *posteriori*), la TRE CORD1.1 ne couvre que la moitié N-NE de la dépression (57 m).

Sur le site CORD2, la forme dépressionnaire correspondant au chenal est encore nettement inscrite dans le paysage (Figs. 8.18 et 8.19), avec un dénivelé actuel de presque 2 m. La section de prospection électrique CORD2.a traverse cette dépression dans toute sa largeur (58 m).

Sur le site CORD3, la topographie est moins contrastée que sur les autres sites du secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier (Figs. 8.18 et 8.20), ce qui rend difficile la délimitation des berges du paléochenal ciblé. Au regard de l'organisation du parcellaire, il est possible que la section de prospection électrique CORD3.a ne couvre pas la totalité de ce paléochenal.

Enfin, le site CORD4 présente un dénivelé particulièrement fort, de l'ordre de 4 à 5 m (Figs. 8.18 et 8.20). La section de prospection électrique CORD4.a couvre ce chenal dans toute sa largeur (76 m) et aucun artefact susceptible de perturber les mesures n'est visible sur le MNT. Par ailleurs, le MNT révèle la présence d'une seconde dépression moins encaissée, située en marge de la rive gauche du chenal (moitié SE du profil topographique), qui correspond probablement à un chenal de crue.

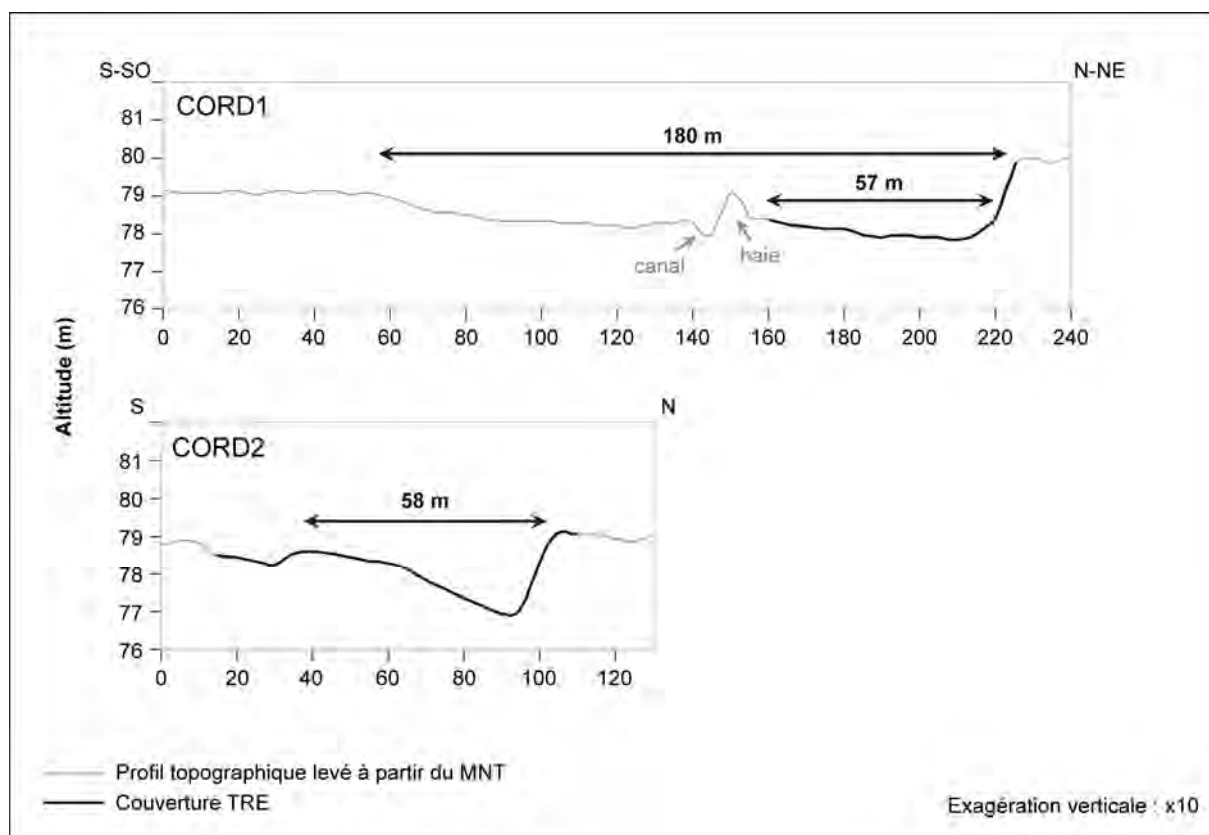


Figure 8.19 : Profils topographiques levés sur les sites CORD1 et CORD2. Les dépressions correspondant aux paléochenaux sont délimitées par une double flèche.

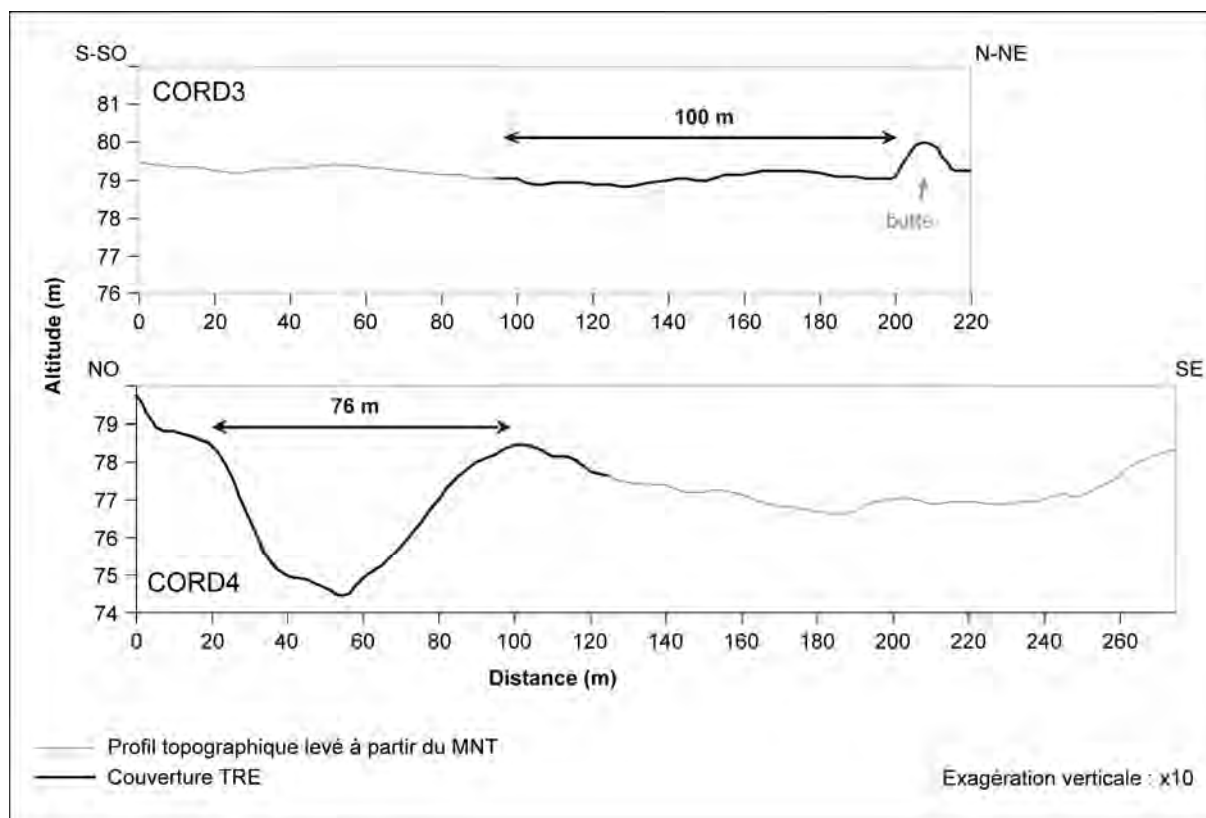


Figure 8.20 : Profils topographiques levés sur les sites CORD3 et CORD4. Les dépressions correspondant aux paléochenaux sont délimitées par une double flèche.

8.3.2. Analyse et interprétation de la géométrie du sous-sol dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier à partir des TRE

8.3.2.1. Identification des paléochenaux sur les TRE

Les informations concernant les TRE levées sur les sites du secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier sont synthétisées dans la table 8.9. Les sections en elles-mêmes sont présentées sur les figures 8.21 et 8.22.

| Site | Section TRE | Larg. dép. (m) | Long. TRE (m) | Déniv. TRE (m) | Ecart. élec. (m) | Prof. max. (m) | Résist. min. (/m) | Résist. max. (/m) | Etendue (/m) |
|--------------|-------------|----------------|---------------|----------------|------------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------|
| CORD1 | CORD1.a | 180 | 63 | 1,25 | 1 | 7 | 9 | 779 | 770 |
| CORD2 | CORD2.a | 58 | 94,5 | 1,48 | 1,5 | 10 | 7 | 3735 | 3728 |
| CORD3 | CORD3.a | 100 | 126 | 2,06 | 2 | 14 | 8 | 1043 | 1035 |
| CORD4 | CORD4.a | 76 | 126 | 4,98 | 2 | 14 | 5 | 2699 | 2694 |

Table 8.9 : Données concernant les TRE du secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier. Largeur de la dépression topographique identifiée sur le MNT ; longueur de la section de prospection électrique ; dénivellé de la section de prospection électrique ; écartement entre les électrodes ; profondeur maximale de mesure ; valeur minimale de résistivité électrique ; valeur maximale de résistivité électrique ; étendue des valeurs de résistivité électrique.

La TRE levée sur le site CORD1 (63 m de longueur et 7 m de profondeur) présente des valeurs de résistivité peu contrastées (entre 9 et 779 Ω/m - Fig. 8.21). Les valeurs les plus fortes (de 42 à 779 Ω/m) forment un corps horizontal en profondeur, qui remonte en surface à l'extrémité NE de la section. Un corps plus conducteur (< 42 Ω/m), susceptible de correspondre au remplissage sédimentaire du paléochenal ciblé, est visible en surface (2 m d'épaisseur). Il forme une dépression plus profonde à l'extrémité SO de la section.

Sur le site CORD2 (TRE CORD2.a : 94,5 m de longueur et 10 m de profondeur), les valeurs de résistivité électrique sont particulièrement fortes et contrastées, allant de 7 à 3735 Ω/m (Fig. 8.21). Un corps lobé très résistant (de ~ 104 à 3735 Ω/m) est visible sur toute la moitié sud de la section et plonge en profondeur sur la moitié nord, où il est recouvert par une unité dépressionnaire plus conductrice (< 104 Ω/m), susceptible de correspondre au remplissage du paléochenal ciblé.

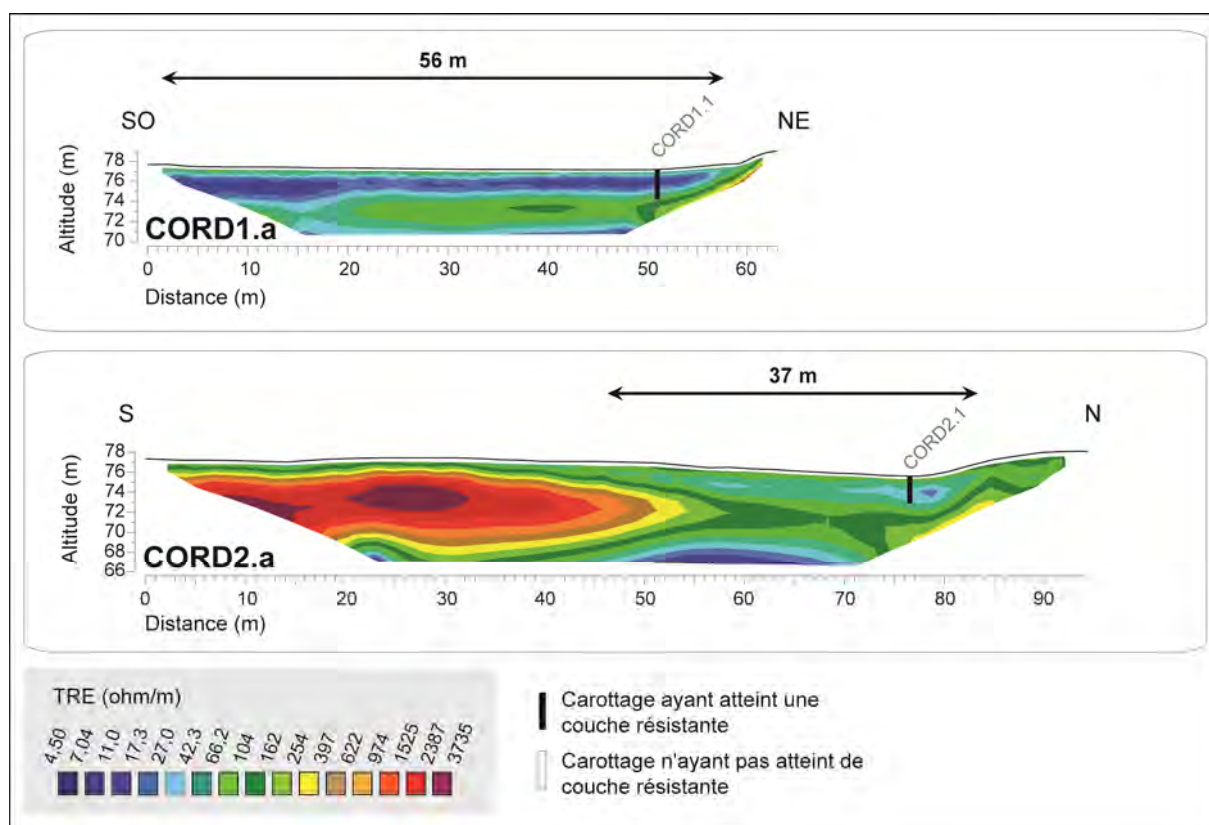


Figure 8.21 : TRE levées sur les sites CORD1 et CORD2.

La TRE CORD3.a (126 m de longueur) atteint une profondeur plus importante que les précédentes (14 m) et présente des valeurs de résistivité contrastées, comprises entre 8 et 1043 Ω/m (Fig. 8.22). Cette section présente une organisation complexe, avec : 1) des valeurs faibles (< 42 Ω/m) en profondeur ; 2) un corps très résistant (de 42 à 1043 Ω/m) à l'extrémité NE de la section ; 3) un second corps relativement résistant (de 42 à > 397 Ω/m) à l'autre extrémité de la section, qui forme un lobe sur 60 m de longueur ; 4) un niveau dépressionnaire conducteur (de 17 à 42 Ω/m) au dessus de ce lobe, susceptible de correspondre au remplissage sédimentaire du paléochenal ciblé et enfin 5) un niveau plus résistant (de 27 à 104 Ω/m) formant une croûte de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres en surface.

Sur le site CORD4, la TRE levée est aussi de grande ampleur (126 m de longueur et 14 m de profondeur - Fig. 8.22). Toutefois, la topographie de surface est nettement plus contrastée (presque 5 m de dénivelé) et les valeurs de résistivité sont plus fortes (de 5 à

2699 Ωm). L'organisation du sous-sol est aussi plus simple : un corps très conducteur (de 5 à 42 Ωm) est visible en profondeur, au centre de la section ; de chaque côté, deux corps plus résistants (de 42 à >622 Ωm au NO et de 27 à 2699 Ωm au SE) couvrent toute l'épaisseur de la section et épousent la pente de la topographie de surface ; au point où ces deux corps se rejoignent, ils sont recouverts par un niveau dépressionnaire de faible résistivité (de <17 à 42 Ωm), qui peut être associé au remplissage sédimentaire du chenal.

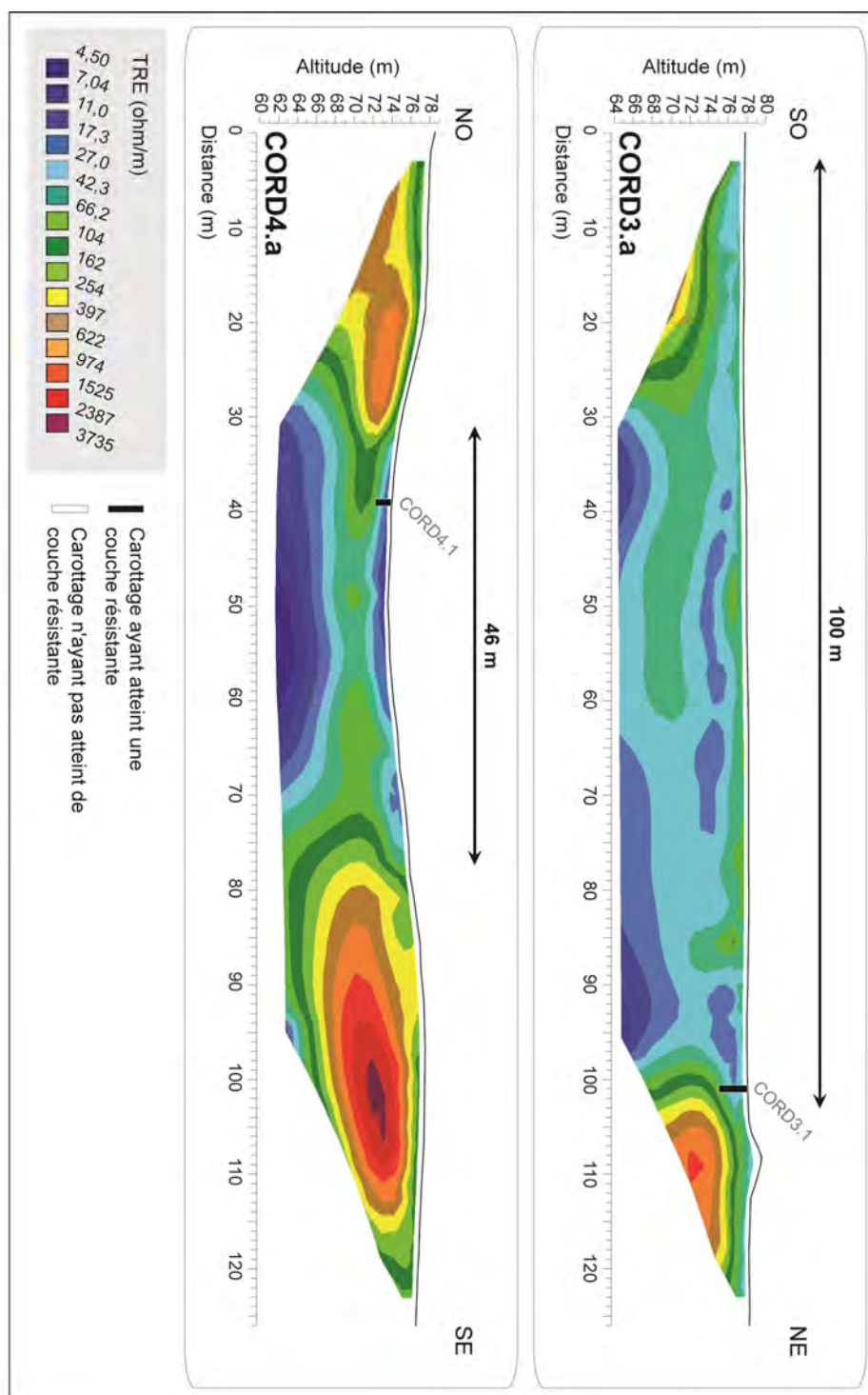


Figure 8.22 : TRE levées sur les sites CORD3 et CORD4.

8.3.2.2. Délimitation des sections mouillées à plein bord et interprétation en termes de paléohydraulique, stade de comblement et taux de sédimentation

Les sections mouillées à plein bord délimitées sur les TRE du secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier sont présentées sur la figure 8.23. Les informations concernant le calcul des indices paléohydrauliques, stades de comblement et vitesses de sédimentation sont données dans la table 8.10. Les profondeurs atteintes par les carottages sédimentaires, utiles à la délimitation des sections mouillées, sont listées plus loin, dans la table 8.11.

| Site | S (m ²) | P (m ²) | Q (m ³ /s) | L (m) | (w/m ²) | Sr (m ²) | SC (%) | Er (m) | t ₀ | VS (cm/an) |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-------|---------------------|----------------------|--------|--------|----------------|------------|
| CORD1 (scénario 1) | 219 | 118 | 259 | 57 | 22 | 197 | 90 | - | - | - |
| CORD1 (scénario 2) | 821 | 362 | 1109 | 180 | 30 | - | - | - | - | - |
| CORD2 | 134 | 118 | 114 | 58 | 10 | 85 | 63 | 1,47 | 1859 | 0,95 |
| CORD3 | 616 | 210 | 988 | 103 | 47 | 616 | 100 | - | - | - |
| CORD4 | 265 | 155 | 297 | 76 | 19 | 102 | 38 | 1,89 | 1859 | 1,22 |

Table 8.10 : Indices paléohydrauliques, stades de comblement et vitesses de remplissage calculés sur les paléochenaux du secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier. Aire de la section mouillée à plein bord (S) ; périmètre de la section mouillée à plein bord (P) ; débit à plein bord (Q) ; largeur à plein bord (L) ; puissance spécifique () ; aire de la section mouillée occupée par le remplissage sédimentaire (Sr) ; stade de comblement (SC) ; épaisseur moyenne du remplissage (Er) ; date estimée de la déconnexion du bras (t₀) ; vitesse de sédimentation (VS). La valeur de pente utilisée pour calculer les paléodébites à plein bord dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier est 0,0005 m/m (Source : IGN, PROFILS). Aucun élément de datation n'étant connu dans ce secteur, les vitesses de sédimentation n'ont pas pu être estimées.

Sur le site CORD1, le carottage effectué à l'extrémité NE du site a atteint un niveau résistant à 2,75 m de profondeur (Table 8.11). Ce niveau correspond à une valeur de résistivité électrique de 66 /m environ sur la TRE CORD1.a. Le fond du chenal a donc été délimité en suivant cette ligne de valeur (Fig. 8.23). Sur ce site, l'analyse du MNT a mis en évidence une grande dépression (180 m de largeur), partiellement couverte par la section de prospection électrique (Figs 8.18 et 8.19). Deux scénarii ont donc été envisagés pour délimiter la section mouillée à plein bord. En supposant que la dépression ciblée par les sondages électriques corresponde au paléochenal ciblé (scénario 1), une largeur à plein bord de 57 m a d'abord été retenue. La section mouillée à plein bord obtenue (219 m² - Fig. 8.23 et Table 8.10) permet d'estimer un paléodébit à plein bord de 259 m³/s et une puissance spécifique de 22 w/m². Le remplissage sédimentaire occupe 90% de cette section mouillée. Aucun élément de datation absolue ne nous permet d'estimer la vitesse de sédimentation pour ce site. Le second scénario, basé sur l'analyse du MNT, envisage un chenal large de 180 m. La section mouillée à plein bord correspondant (821 m²) a été dessinée en prolongeant le fond délimité sur la TRE (Fig. 8.23). Cette section permet d'estimer un paléodébit à plein bord de 1109 m³/s et une puissance spécifique de 30 w/m² (Table 8.10). La présence d'une fosse dans la partie SO de la section, correspondant à la rive convexe du méandre, pose toutefois question. Cette forme est en opposition avec la logique géomorphologique qui voudrait une pente ascendante en ce point, correspondant à une barre de méandre. Il est donc possible que la TRE révèle ici un artéfact lié à la mise en place du canal ou une zone d'incision du chenal.

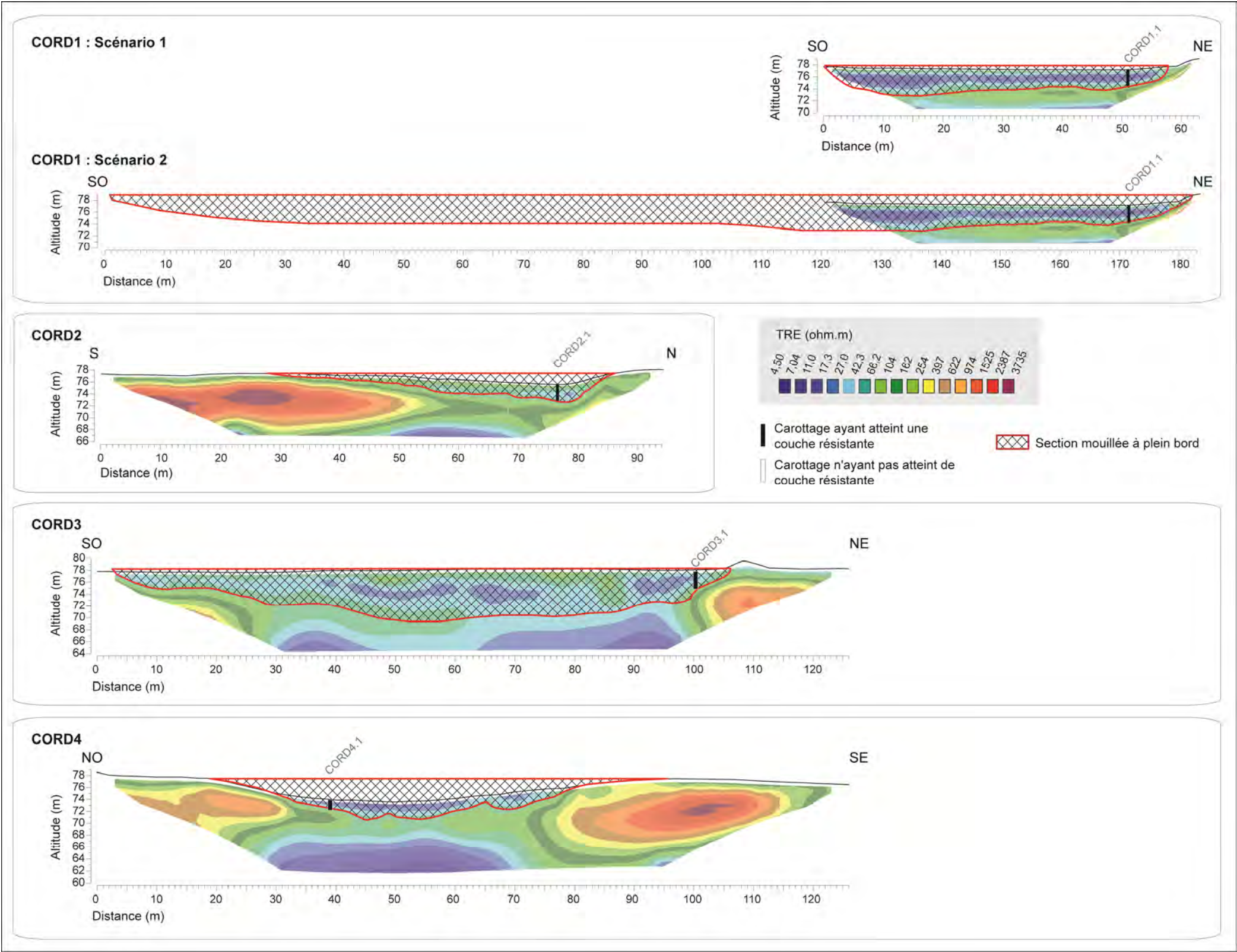


Figure 8.23 : Délimitation des sections mouillées à plein bord à partir des TRE levées dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier.

Sur le site CORD2, le carottage effectué dans la zone la plus profonde du paléochenal, a atteint un niveau résistant à 2,55 m de profondeur (Table 8.11). Ce niveau correspond à une valeur de résistivité électrique de l'ordre de 66 Ω /m sur la TRE CORD2.a (Fig. 8.23). Le fond du chenal a donc été délimité en suivant cette ligne de valeur. La section mouillée à plein bord obtenue (134 m² - Fig. 8.23 et Table 8.10) permet d'estimer un paléodébit à plein bord de 114 m³/s et une puissance spécifique de 10 w/m². Le remplissage sédimentaire n'occupe que 63% de cette section mouillée. Au regard des cartes historiques, le bras sondé sur le site CORD2 s'est déconnecté du chenal principal entre 1850 et 1868. En considérant 1859 comme date potentielle de déconnexion, il est possible d'envisager une vitesse moyenne de sédimentation de 0,95 cm/an (Table 8.10).

Sur le site CORD3, le carottage effectué à l'extrémité NE de la section a atteint un niveau résistant à 3 m de profondeur (Table 8.11). Ce niveau correspond à une valeur de résistivité électrique comprise entre 66 et 104 Ω /m sur la TRE CORD3.a. Toutefois, cette ligne de valeur n'est pas continue (Fig. 8.23). L'absence de fond résistant au centre de la section est peut-être liée à un surcreusement du chenal dans le substratum molassique. A partir de cette hypothèse, nous avons envisagé un scénario pré-incision, en délimitant la section mouillée à plein bord par prolongement de la forme lobée visible sur la moitié SO de la TRE, susceptible de correspondre à un banc de convexité (Fig. 8.23). La section mouillée à plein bord ainsi obtenue (616 m² - Table 8.10) permet d'estimer un paléodébit à plein bord de 988 m³/s et une puissance spécifique de 47 w/m². Le remplissage sédimentaire occupe 100% de cette section mouillée. Aucun élément de datation absolue ne nous permet d'estimer une vitesse de sédimentation sur ce site.

Sur le site CORD4, le carottage a atteint un niveau résistant à 1,45 m de profondeur (Table 8.11), qui correspond à nouveau à une valeur de résistivité électrique de l'ordre de 66 Ω /m (Fig. 8.23). Le fond du chenal a donc été délimité en suivant cette ligne de valeur. La section mouillée à plein bord obtenue (265 m² - Fig. 8.23 et Table 8.10) permet d'estimer un paléodébit à plein bord de 297 m³/s et une puissance spécifique de 19 w/m². Le remplissage sédimentaire occupe seulement 38% de cette section mouillée. En considérant à nouveau 1859 comme date potentielle de déconnexion, il est possible d'envisager une vitesse moyenne de sédimentation de 1,22 cm/an (Table 8.10).

8.3.3. Analyse du remplissage des paléochenaux du secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier à partir des logs sédimentaires

Les informations concernant les carottages réalisés dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier (type de gouge, longueur prélevée, longueur perdue et profondeur à laquelle la grave a été atteinte) sont synthétisées dans la table 8.11. Les logs sédimentaires sont présentés sur les figures 8.24 à 8.27. Dans ce secteur, aucun élément organique susceptible d'être daté n'a pu être trouvé.

| Site | Carotte | Gouge | Longueur prélevée (m) | Longueur perdue (m) | Profondeur de la grave (m) |
|-------|---------|--------|-----------------------|---------------------|----------------------------|
| CORD1 | CORD1.1 | Fermée | 3 | 0 | 2,75 |
| CORD2 | CORD2.1 | Fermée | 2,80 | 0 | 2,55 |
| CORD3 | CORD3.1 | Fermée | 3 | 0 | 3 |
| CORD4 | CORD4.1 | Fermée | 1,70 | 0 | 1,45 |

Table 8.11 : Informations concernant les carottages réalisés dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier.

8.3.3.1. Du log à l'interprétation des processus et environnements de dépôt : la carotte CORD1.1

Sur le site CORD1, le carottage a été effectué à l'extrémité NE du paléochenal identifié sur la TRE CORD1.a (Fig. 8.23). La berge étant abrupte, la carotte CORD1.1 (3 m de longueur - Table 8.11) semble comme convenu avoir été prélevée dans les niveaux de remplissage.

Les échantillons sédimentaires prélevés dans cette carotte (Fig. 8.24-A) appartiennent tous à la classe granulométrique 1 (argiles à limons fins, relativement chargés en matière organique et en carbonates). Jusqu'à 2,20 m de profondeur, les niveaux sont essentiellement massifs et se caractérisent par la présence de nodules ferrugineux et par un aspect tacheté (faciès Fr - Miall, 1996). A partir de 2,20 m, les niveaux deviennent stratifiés (faciès FI - Miall, 1996) et des fragments végétaux ainsi que des racines sont observés. A 2,75 m de profondeur, le carottage a pénétré dans un niveau de galets et graviers, dont la partie supérieure (25 cm) a pu être prélevée.

La projection des valeurs granulométriques sur l'image CM (Fig. 8.24-B) révèle une grande homogénéité du remplissage de ce chenal en termes de processus de dépôt. En effet, les échantillons prélevés se situent tous dans le segment T, qui est associé au processus de décantation et qui traduit donc un dépôt en contexte d'eau stagnante (e.g., bras mort). La présence du faciès Fr révèle la transformation post-dépositionnelle (processus pédogéniques) des niveaux. Le ratio entre Fr (2,20 m) et FI (55 cm) peut être interprété comme le signe d'un stade avancé de pédogénèse sur ce site.

8.3.3.2. Du log à l'interprétation des processus et environnements de dépôt : la carotte CORD2.1

Sur le site CORD2, la carotte COR2.1 (2,80 m de longueur - Table 8.11) a été prélevée au point le plus bas de la dépression topographique associée au paléochenal ciblé (Fig. 8.23). Elle fournit donc une vue représentative des niveaux de remplissage.

Les échantillons sédimentaires prélevés dans cette carotte (Fig. 8.25-A) appartiennent essentiellement à la classe granulométrique 1 (argiles à limons fins, relativement chargés en matière organique et en carbonates). Seuls trois niveaux fins se caractérisent par leur appartenance à la classe granulométrique 2 (niveaux sablo-limoneux à limono-sableux, moins chargés en carbone organique). Un changement d'aspect est observé à 0,90 m de profondeur, avec une transition entre niveaux massifs bioturbés (faciès Fr, Miall, 1996) et niveaux stratifiés (faciès FI, Miall, 1996). A 2,55 m de profondeur, un niveau de graviers et galets a été atteint, dont la partie supérieure (20 cm) a pu être prélevée.

La projection des valeurs granulométriques sur l'image CM (Fig. 8.25-B) révèle ici encore un remplissage essentiellement formé par décantation (segment T), en contexte d'eau stagnante (e.g., bras mort). Toutefois, les grains s'avèrent moins fins que ceux prélevés dans la carotte CORD1.1 (partie haute du segment T) et certains échantillons sont associés à un processus de suspension uniforme (segment RS). Des phases d'écoulement dans le bras mort, marquées par un débit très faible, peuvent donc être envisagées. Le ratio entre l'épaisseur de faciès FI (1,50 m) et l'épaisseur de faciès Fr (90 cm) révèle ici une meilleure préservation post-dépositionnelle des niveaux sédimentaires que sur le site CORD1 et par là même un moindre développement du sol.

8.3.3.3. Du log à l'interprétation des processus et environnements de dépôt : la carotte CORD3.1

Sur le site CORD3, la carotte CORD3.1 a été prélevée à l'extrémité NE du paléochenal ciblé (Fig. 8.23). Au vu de la TRE, l'épaisseur de remplissage prélevée (3 m - Table 8.11) n'est pas maximale.

La carotte CORD3.1 (Fig. 8.26-A) est entièrement composée de niveaux limoneux massifs tachetés (faciès Fr - Miall, 1996). Les échantillons prélevés dans cette carotte appartiennent en partie à la classe granulométrique 1 (argiles à limons fins, relativement chargés en matière organique et en carbonates) et en partie à la classe granulométrique 2 (niveaux sablo-limoneux à limono-sableux, moins chargés en carbone organique). Les derniers centimètres prélevés correspondent à des graviers, qui révèlent probablement la proximité immédiate d'une couche de galet.

La projection des valeurs granulométriques sur l'image CM (Fig. 8.26-B) révèle ici encore la dominance des dépôts de décantation (partie haute du segment T), qui traduisent un contexte d'eau stagnante (e.g., bras mort). Toutefois, une plus grande diversité des processus est observée sur ce site, avec quelques niveaux formés par suspension uniforme (segment RS) et quelques échantillons plus grossiers et marginaux, situés dans le segment QR3. Ces échantillons sont susceptibles de traduire des événements d'écoulement dans le bras mais peuvent aussi dépendre d'une mauvaise dispersion des grains au moment de la mesure granulométrique. Le log de synthèse révèle ici une perturbation post-dépositionnelle des niveaux de sédimentation (processus pédogéniques) sur toute l'épaisseur du prélèvement (3 m), i.e. la présence d'un sol particulièrement développé.

8.3.3.4. Du log à l'interprétation des processus et environnements de dépôt : la carotte CORD4.1

Sur le site CORD4, la carotte CORD4.1 a été prélevée légèrement en marge du fond de chenal (Fig. 8.23) en raison d'un terrain particulièrement humide à la date du sondage. L'épaisseur de remplissage prélevée (1,70 m - Table 8.11) n'est donc pas maximale.

La carotte CORD4.1 (Fig. 8.27-A) présente des niveaux limoneux massifs jusqu'à 0,90 m de profondeur, ponctuellement marqués par un aspect tacheté (Faciès Fr - Miall, 1996). À partir de 0,90 m de profondeur, les limons deviennent stratifiés (Faciès FI - Miall, 1996). À 1,45 m, le carottage a rencontré un niveau de galet, dont la partie supérieure (25 cm) a pu être prélevée.

La projection des valeurs granulométriques sur l'image CM (Fig. 8.27-B) révèle des similitudes entre cette carotte (CORD4.1) et la carotte CORD1.1, avec des échantillons uniquement concentrés dans le segment T (décantation). Ces données traduisent donc un remplissage intégral en contexte d'eau stagnante (e.g., bras mort). Le log de synthèse révèle ici une épaisseur relativement réduite de faciès Fr (0,90 m), équivalente à celle observée sur le log de la carotte CORD2.1.

8.3.4. Synthèse des informations recensées dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier

Quatre sites ont été sondés dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier. Les sondages effectués sur les sites situés à proximité du lit actuel de la Garonne (CORD2 et CORD4), ciblaient deux bras en phase de déconnexion sur la carte de 1868 : le chenal ciblé sur le site CORD4 est un ancien méandre de grande amplitude ; le chenal ciblé sur le site CORD2 correspond à un chenal de recoupement de cette boucle de méandre. Les sondages effectués sur les deux autres sites (CORD1 et CORD3) ciblaient deux grands méandres supposés antérieurs à la période couverte par les cartes historiques (1750-2000), pour lesquels aucun élément de datation absolue n'était connu *à priori*.

Le croisement des données topographiques, géophysiques et sédimentaires a permis de vérifier la présence de ces quatre paléochenaux. Les chenaux les plus récents (CORD2 et CORD4) sont encore nettement inscrits dans la topographie de la plaine avec des dénivelés de l'ordre de 1,5 à 5 m et un remplissage sédimentaire occupant respectivement 63% et 38% de leur forme. Des vitesses de sédimentation de l'ordre de 0,95 et 1,22 cm/an ont été estimées pour ces sites. Les chenaux les plus anciens (CORD1 et CORD3) ont été plus difficiles à délimiter, tant en surface (largeur à plein bord) qu'en profondeur (fond et berge). Ces formes se caractérisent par des stades d'évolution plus avancés (le remplissage sédimentaire occupe 90 à 100% de la surface des sections mouillées à plein bord).

Les remplissages sédimentaires de ces chenaux se caractérisent par une granulométrie particulièrement fine et homogène, associée à une teneur en matière organique relativement forte (dominance de la classe granulométrique 1 et des faciès Fr et Fl). Ces dépôts, principalement attribués à des processus de décantation et de suspension uniforme, traduisent un contexte de sédimentation en eau stagnante ou quasi-stagnante (bras mort).

Aucun marco-reste végétal susceptible de permettre une datation ^{14}C n'a pu être trouvé dans ce secteur. De ce fait, les paléochenaux CORD1 et CORD3 restent indatés.



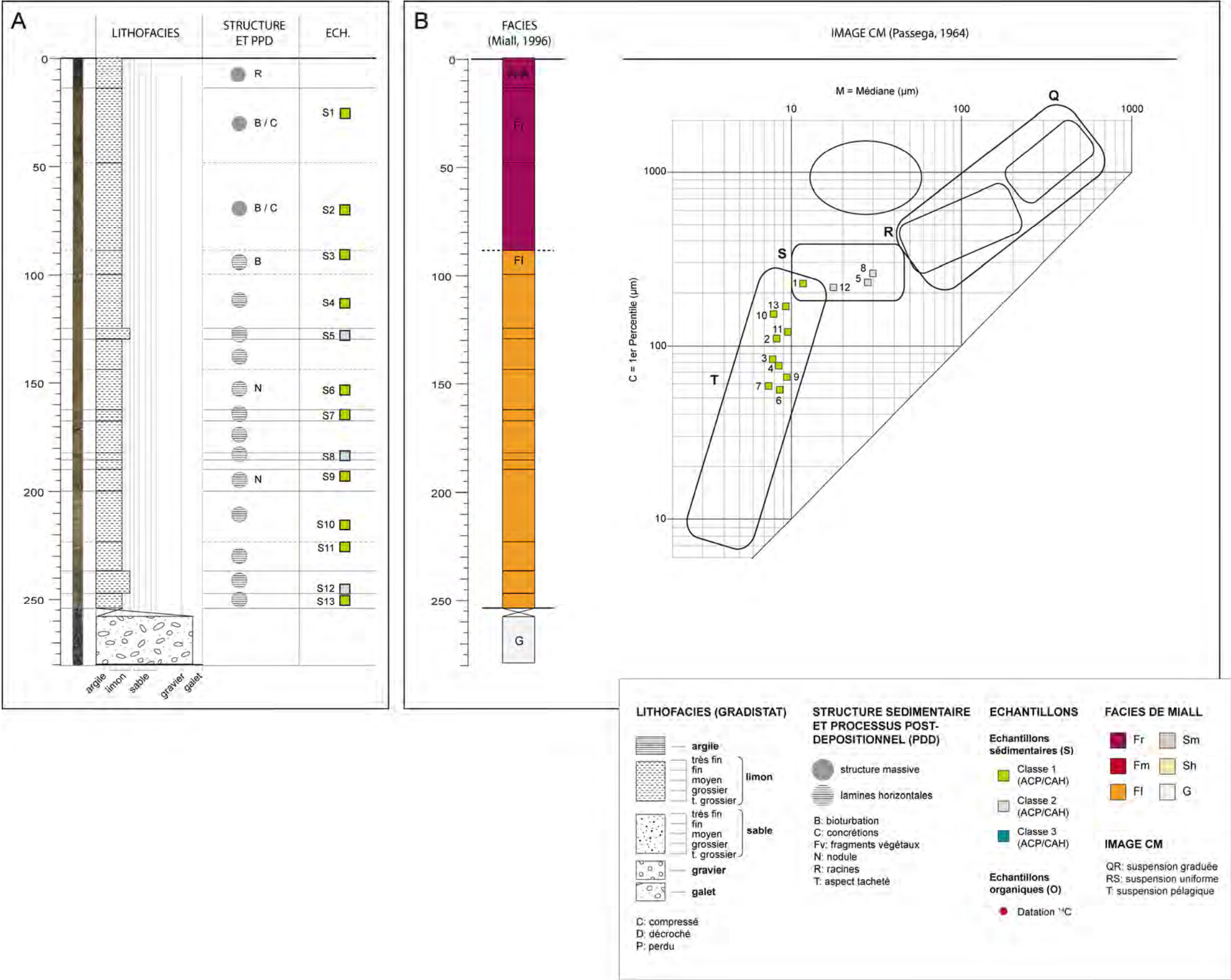


Figure 8.25 : Log sédimentaire de la carotte CORD2.1. A - Eléments de description. B - Eléments d'interprétation.

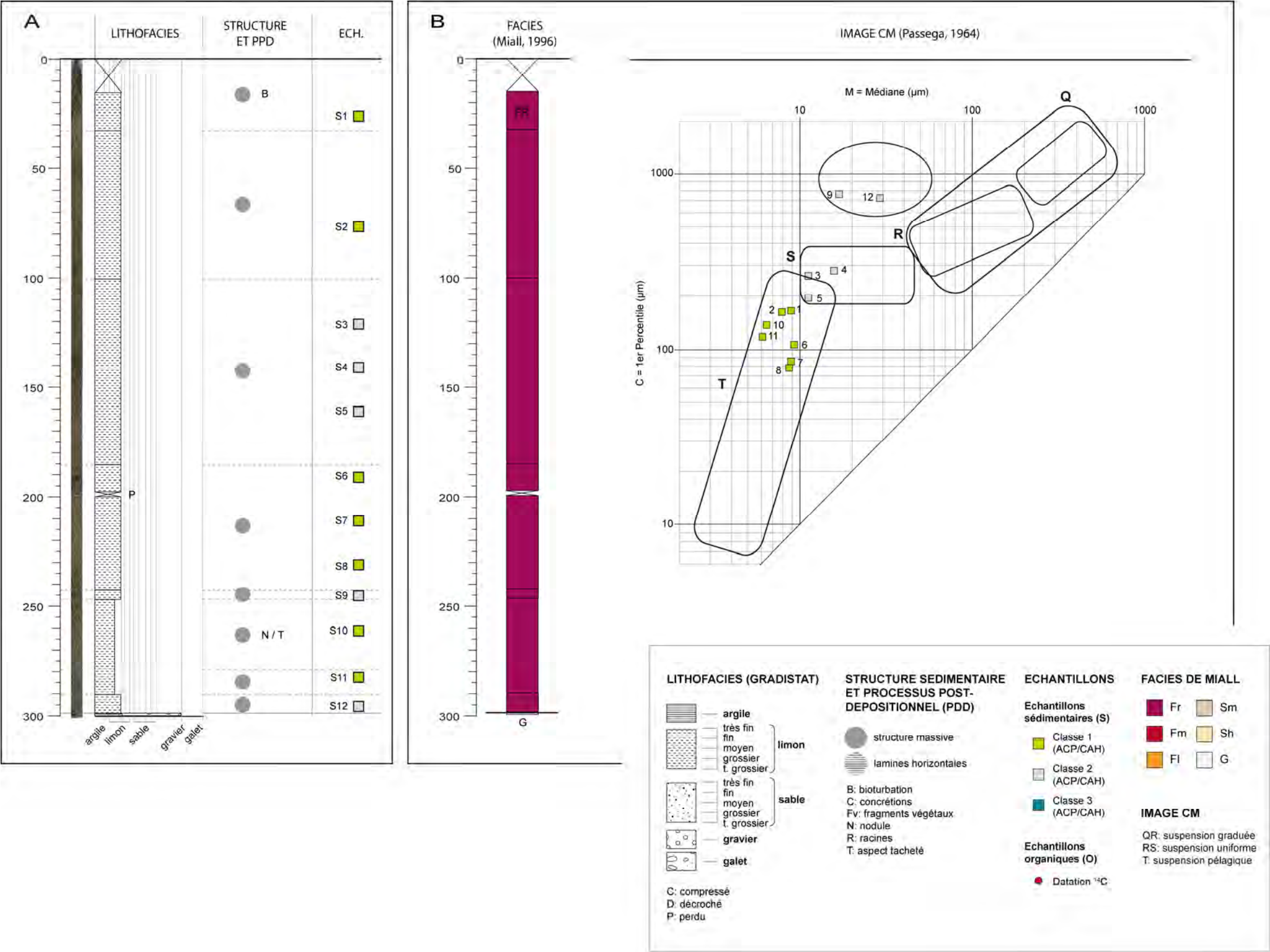


Figure 8.26 : Log sédimentaire de la carotte CORD3.1. A - Eléments de description. B - Eléments d'interprétation.

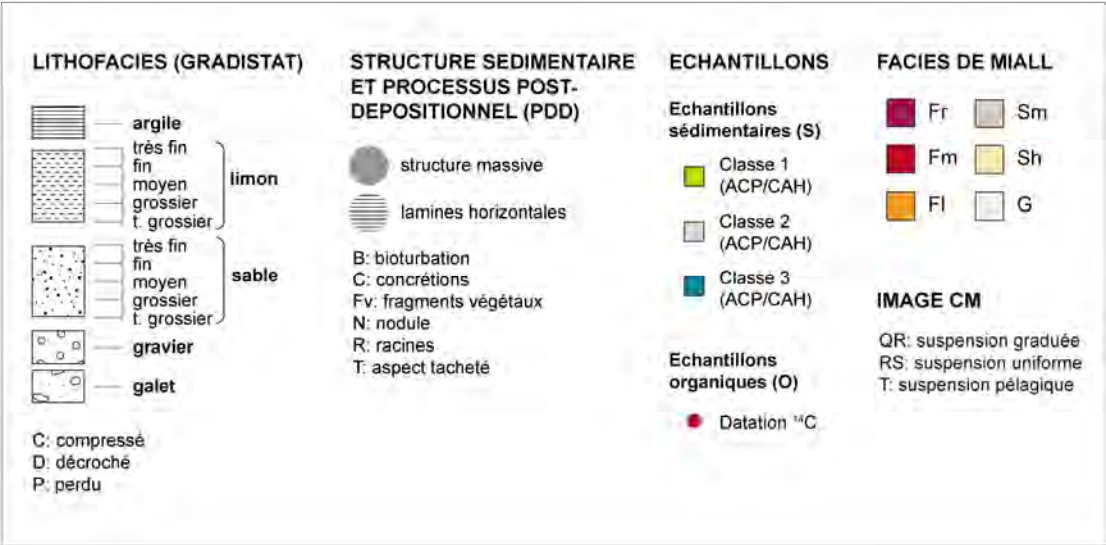
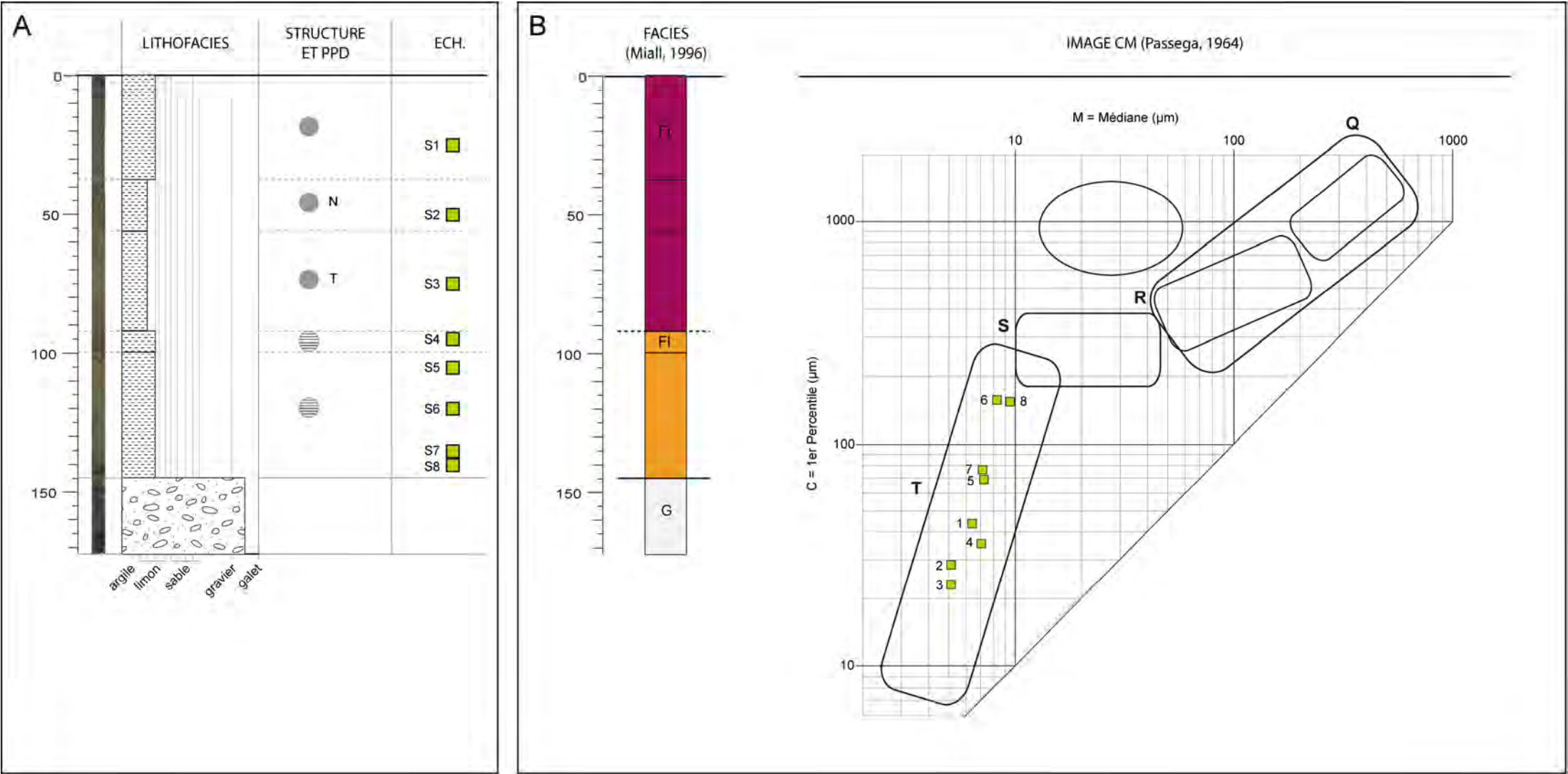


Figure 8.27 : Log sédimentaire de la carotte CORD4.1. A - Eléments de description. B - Eléments d'interprétation.

8.4. Conclusion du chapitre 8

Parmi les 11 sites sondés dans les secteurs de Grenade/Ondes, Verdun-sur-Garonne/Dieupentale et Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier, neuf sites ont clairement pu être associés à des paléochenaux de la Garonne (sur le site PLUM, aucune zone dépressionnaire n'a été identifiée ; sur le site STRO, une zone dépressionnaire est bien visible dans la topographie de surface mais elle ne se retrouve pas clairement en profondeur, probablement en raison de modifications anthropiques).

Les paléochenaux, qui ont d'abord été identifiés dans la topographie (MNT haute résolution), présentent des largeurs à plein bord comprises entre 25 et 180 m. Le croisement entre les données topographiques, géophysiques (TRE) et sédimentaires a ensuite permis de délimiter des sections mouillées à plein bord de l'ordre de 45 à 821 m². Les mesures faites sur ces sections mouillées, associées à des valeurs de pente mesurées en 1987 (IGN, PROFILS), ont fourni des valeurs de paléodébit à plein bord comprises entre 32 et 1109 m³/s et des valeurs de puissance spécifique de l'ordre de 6 à 60 w/m². Par ailleurs, les mesures faites sur les sections mouillées ont permis d'obtenir des valeurs de stade de comblement comprises entre 38 et 100%, ainsi que des vitesses de sédimentation de l'ordre de 0,95 à 1,24 cm/an dans les cas où la date de déconnexion est connue (chenaux renseignées par les cartes historiques).

Les carottes sédimentaires prélevées sur les différents sites présentent des longueurs comprises entre 1,70 et 5 m. Les données de synthèse concernant le remplissage sédimentaire des chenaux (faciès de Miall, 1996 et image CM) ont révélé un modèle dominant marqué par : 1) une granulométrie fine et un faciès Fr en surface, caractéristique des dépôts de plaine alluviale et 2) une granulométrie généralement plus grossière et une organisation stratigraphique plus complexe en profondeur, correspondant aux premières phases de comblement post-déconnexion des chenaux.

Quatre fragments organiques, prélevés à la base des carottes GRE, JUL et MAG, ont fourni des éléments de datation (995-1380 cal. AD - 2 sigma) et ont ainsi permis d'estimer des vitesses de sédimentation (0,30-0,51 cm/an) pour ces sites antérieurs à la période couverte par les cartes. En raison de la faible teneur des carottes en archive organique, deux paléochenaux identifiés dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier restent indatés.

Chapitre 9. - Capacité hydraulique, phase de déconnexion et évolution post-déconnexion des chenaux au cours du dernier millénaire : disparités spatiales et temporelles

L'objectif de ce chapitre est de mettre en évidence des disparités spatiales et/ou temporelles au sein de la Garonne toulousaine à partir des données de terrain présentées précédemment (chapitre 8), recensées sur une série de paléochenaux de la Garonne. Dans cette optique, trois temps de l'histoire des chenaux sont abordés : 1) la phase d'activité du chenal, appréhendée via l'analyse de la capacité hydraulique des chenaux (paléodébits à plein bord) ; 2) la phase de déconnexion des bras, abordée à partir de l'observation des niveaux de remplissage profonds et 3) l'évolution post-déconnexion des bras, caractérisée par l'épaisseur du faciès Fr, le stade de comblement et la vitesse de sédimentation. Un dernier point de discussion (4) concerne la conservation des archives fluviales et l'incision du chenal actuel, abordées via le positionnement des chenaux par rapport au lit actuel.

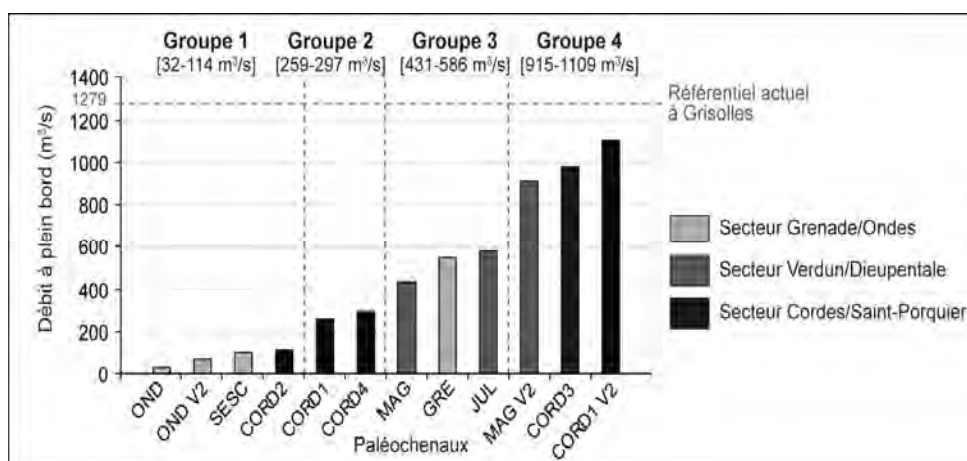
9.1. Capacités hydrauliques avant déconnexion

Le paléodébit à plein bord est un indice associé à une forte incertitude du fait qu'il repose sur des valeurs de géométrie du chenal estimées et sur une valeur de pente ultérieure à la période de fonctionnement du chenal (profils de 1987, IGN PROFILS). De plus, cet indice a ici été calculé selon la formule de Manning, adaptée aux sections rectilignes et non aux sinuosités. Malgré ces limites, les valeurs de paléodébit à plein bord obtenues permettent de révéler des tendances discordantes en termes de capacité hydraulique, qui s'avèrent corrélées aux périodes de fonctionnement des chenaux.

9.1.1. Typologie des chenaux selon leur capacité hydraulique

La synthèse des paléodébits à plein bord estimés à partir des mesures de géométrie hydraulique réalisées sur les paléochenaux de la Garonne toulousaine, met en évidence quatre niveaux de capacité hydraulique (Fig. 9.1) : 1) des chenaux seulement capables d'écouler des débits inférieurs à 120 m³/s ; 2) des chenaux capables d'écouler des débits compris entre 250 et 300 m³/s ; 3) des chenaux capables d'écouler des débits de l'ordre de 400 à 600 m³/s et enfin 4) des chenaux capables d'écouler des débits de l'ordre de 900 à 1100 m³/s.

Figure 9.1 :
Histogramme des
paléodébits à
plein bord estimés
le long de la
Garonne
toulousaine.



9.1.1.1. Les chenaux caractérisés par un débit à plein bord inférieur à $120 \text{ m}^3/\text{s}$ (groupe 1)

Le premier groupe de capacité hydraulique (Fig. 9.2) se compose de deux chenaux du secteur de Grenade/Ondes (OND et SESC) et d'un chenal du secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier (CORD2), qui présentent des débits à plein bord très faibles, inférieurs au débit moyen actuel de la Garonne à Toulouse ($189 \text{ m}^3/\text{s}$).

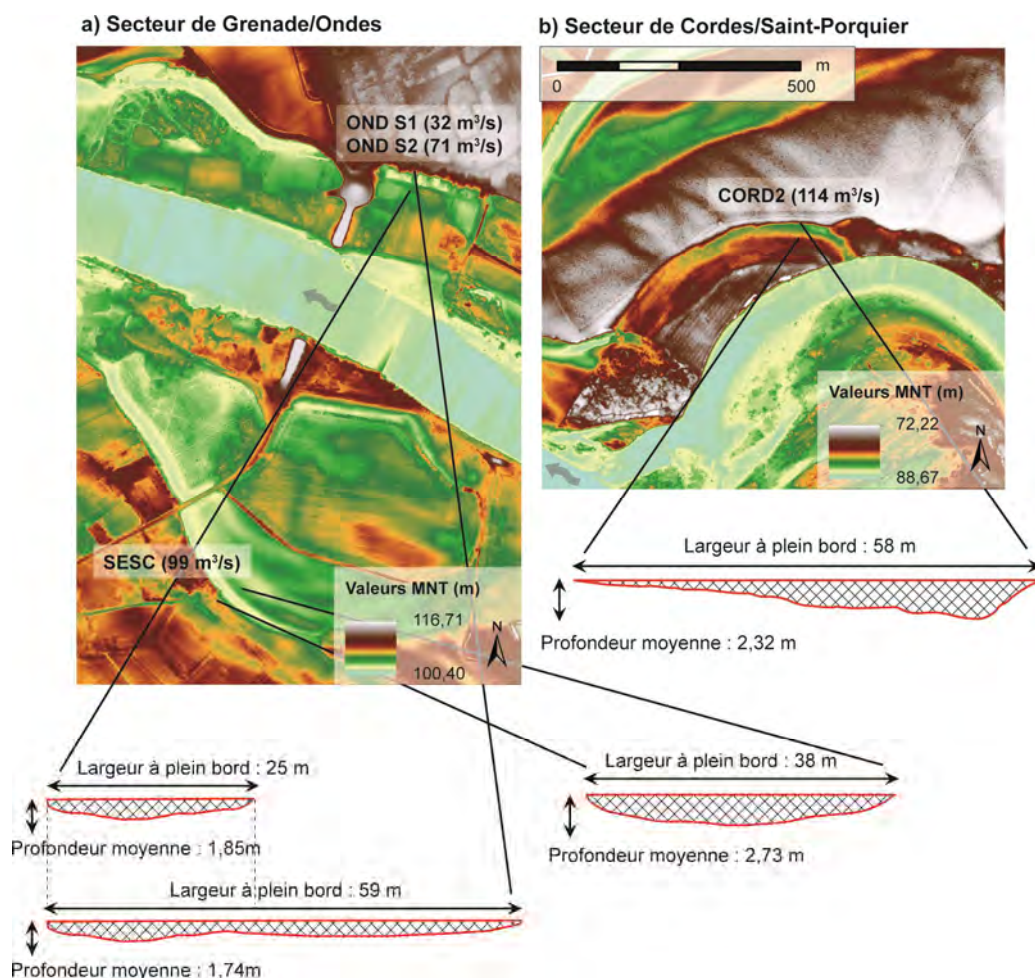


Figure 9.2 : Comparaison des sections mouillées à plein bord des chenaux du groupe 1 (débits à plein bord $< 120 \text{ m}^3/\text{s}$).

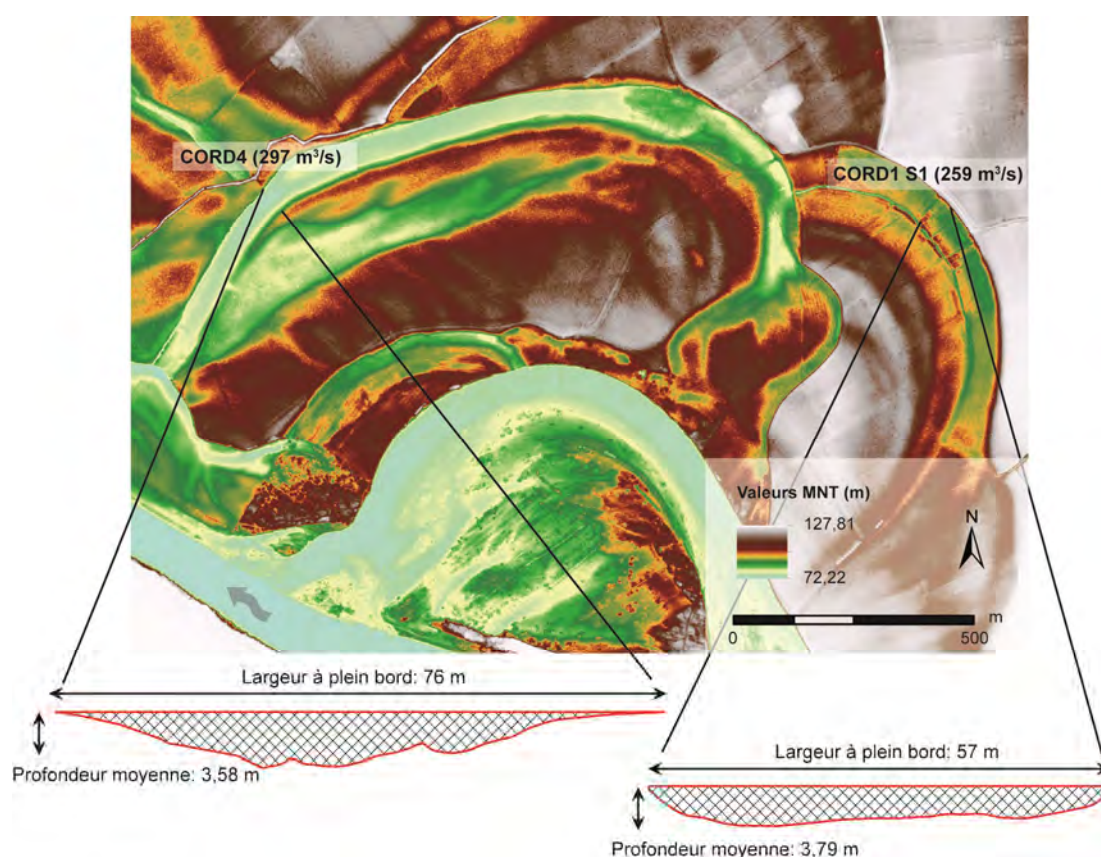
Dans le secteur de Grenade/Ondes, deux scénarii ont été proposés pour le chenal OND (Fig. 9.2-a), pour lequel la largeur à plein bord est difficile à estimer en raison de la présence d'une route. Pour rappel, dans le cas de la première mesure ($32 \text{ m}^3/\text{s}$), la dépression visible sur la TRE a été assimilée au paléochenal ; dans le cas de la seconde mesure ($71 \text{ m}^3/\text{s}$), la largeur du chenal a été prolongée jusqu'à atteindre une rupture de pente visible sur le MNT et le fond a été délimité par extrapolation des profondeurs estimées dans la zone de sondage. Quel que soit le scénario proposé, le chenal identifié présente la capacité hydraulique la plus réduite.

Dans le cas du site SESC (Fig. 9.2-a), les mesures réalisées sont plus fiables, avec une dépression encore bien délimitée dans la topographie de surface et un fond de chenal clairement visible sur la TRE SESC.a. Le débit à plein bord calculé sur ce site ($99 \text{ m}^3/\text{s}$) reste dans le même ordre de grandeur que la valeur obtenue sur le site OND (scénario 2).

Sur le site CORD2 (Fig. 9.2-b), situé dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier, une dépression bien visible dans la topographie de surface et sur les images du sous-sol a aussi été identifiée. La forme de la section mouillée présente une dissymétrie caractéristique des secteurs de lobe de méandre, avec une zone profonde au pied de la rive concave et une pente douce en rive convexe, correspondant probablement à une barre de méandre. La largeur à plein bord (58 m) se situe dans le même ordre de grandeur que celle estimée sur le site OND (scénario 2). Le débit à plein bord estimé (114 m³/s) est légèrement supérieur aux débits estimés sur les sites OND et SESC.

9.1.1.2. Les chenaux caractérisés par un débit à plein bord de l'ordre de 250 à 300 m³/s (groupe 2)

Les chenaux caractérisés par des débits à plein bord de l'ordre de 250 à 300 m³/s sont les chenaux CORD1 et CORD4, sondés dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier (Fig. 9.3).



Sur le site CORD4 (Fig. 9.3), la forme du chenal est bien inscrite dans la topographie de surface et sur la TRE. La section mouillée à plein bord a ainsi pu être facilement délimitée. Les mesures effectuées sur ce chenal ont permis d'estimer un débit à plein bord de l'ordre de 297 m³/s, qui reste parmi les valeurs les plus faibles obtenues dans cette étude.

Les mesures effectuées sur le site CORD1 dans le cadre du premier scénario envisagé (Fig. 9.3), sont associées à une forte incertitude concernant la délimitation de la section mouillée. Pour rappel, la berge convexe étant peu marquée dans la topographie de surface,

la délimitation de la largeur à plein bord a d'abord reposé sur le parcellaire. L'analyse du MNT et de la TRE opérée dans un second temps, a révélé une sous-estimation potentielle de cette largeur et donc du débit à plein bord ($259 \text{ m}^3/\text{s}$). Un second scénario plus crédible a donc été proposé, qui a permis d'obtenir un débit nettement supérieur, positionné parmi les plus forts observés dans cette étude (groupe 4).

9.1.1.3. Les chenaux caractérisés par un débit à plein bord de l'ordre de $400 \text{ à } 600 \text{ m}^3/\text{s}$ (groupe 3)

Le groupe 3 se compose de chenaux moins homogènes, avec des débits à plein bord estimés qui varient entre 430 et presque $600 \text{ m}^3/\text{s}$ (Fig. 9.4). Ce groupe rassemble un chenal du secteur de Grenade/Ondes (GRE) et les deux chenaux du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale (MAG et JUL).

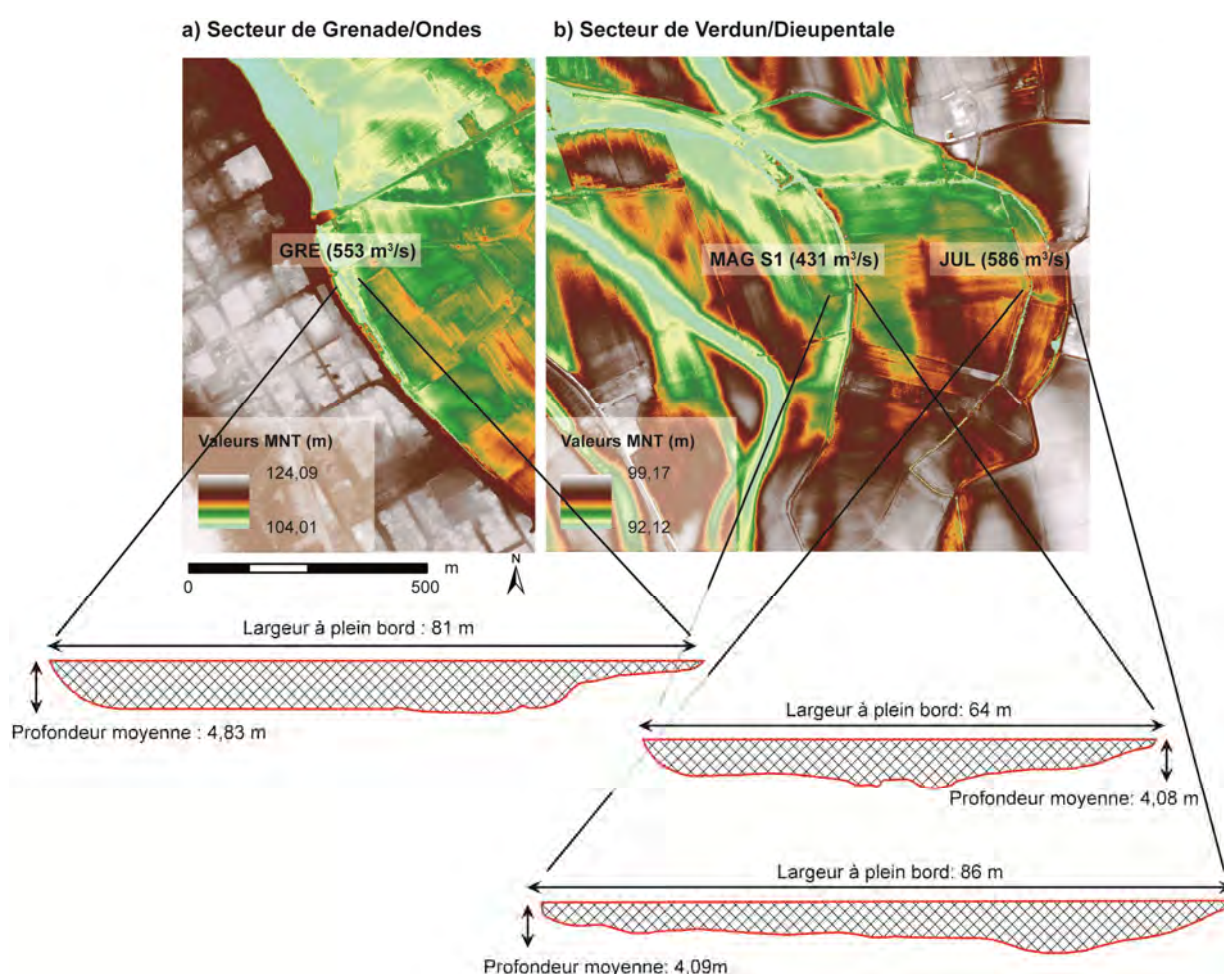


Figure 9.4 : Comparaison des sections mouillées à plein bord des chenaux du groupe 3 (débits à plein bord compris entre 400 et $600 \text{ m}^3/\text{s}$).

Dans le secteur de Grenade/Ondes, la forme du chenal GRE (Fig. 9.4-a) est associée à une légère incertitude. Pour rappel, la délimitation du fond sur la moitié O-SO de la TRE GRE.a a dû être extrapolée en raison de la présence d'un canal qui empêche d'appréhender la totalité de la section mouillée par la géophysique. De plus, la présence d'un niveau colluvial formé par l'érosion du talus de terrasse a rendu difficile la délimitation de la rive concave. La section mouillée à plein bord finalement délimitée s'individualise par un ratio

largeur/profondeur faible, avec une largeur à plein bord de 81 m, pour une profondeur moyenne supérieure aux autres chenaux du groupe 3 (4,83 m). Cette géométrie peut s'expliquer par un écoulement contraint par le talus de terrasse, susceptible de générer un phénomène d'incision. A partir de cette section mouillée, un débit à plein bord de 553 m³/s a été estimé, qui reste très inférieur au débit à plein bord actuel (1279 m³/s au niveau du méandre de Grisolles - cf. groupe 4).

Dans le secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale, les mesures effectuées sur les sites MAG et JUL (Fig. 9.4-b) sont plus approximatives, notamment en raison d'une faible inscription des formes dans la topographie de surface et d'une résistivité électrique peu contrastée en sous-sol qui limite l'identification des corps sédimentaires sur les TRE. Par ailleurs, la valeur de pente utilisée pour ces sites (0,0009 m/m - IGN, PROFILS) est supérieure à la valeur utilisée pour les autres secteurs (0,0005 m/m - IGN, PROFILS).

Dans le cas du chenal JUL, la position du fond a été déduite des valeurs de résistivité qui caractérisent la grave sur le site MAG, situé à quelques dizaines de mètres. Bien que les contrastes de résistivité soient comparables entre les deux sites, aucune donnée de terrain ne nous permet de valider cette hypothèse. Par ailleurs, la largeur à plein bord du chenal JUL (86 m), bien que comparable à celle obtenue sur le site GRE, a pu être sous-estimée du fait que la forme de la berge concave est difficilement lisible sur la TRE et peu marquée dans la topographie de surface. Un débit à plein bord de 586 m³/s a été estimé, qui reste dans le même ordre de grandeur que la valeur obtenue sur le site GRE.

Dans le cas du site MAG, les mesures effectuées dans le cadre du premier scénario envisagé (Fig. 9.4) reposent sur une section mouillée à plein bord délimitée à partir de la dépression la plus marquée dans le paysage (parcellaire), alors qu'une dépression plus large est visible sur le MNT. La valeur de débit à plein bord obtenue (431 m³/s) est donc susceptible d'être sous-estimée. Pour ce site, un second scénario a donc été proposé sur observation du MNT, qui positionne le chenal MAG dans le groupe 4, correspondant aux débits à plein bord les plus forts.

9.1.1.4. Les chenaux caractérisés par un débit à plein bord de l'ordre de 900 à 1100 m³/s (groupe 4)

Un chenal du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale (MAG - scénario 2) et deux chenaux du secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier (CORD1 - scénario 2 et CORD3) sont caractérisés par des débits à plein bord compris entre 910 et 1110 m³/s (Fig. 9.5-a et b). Ces valeurs maximales se rapprochent du débit à plein bord actuel (1279 m³/s) calculé au niveau du méandre de Grisolles à partir d'un profil daté de la fin des années 1990 (Sauvage, 1999 - Fig. 9.5-c). Toutefois, chacune est associée à une forte incertitude.

Pour rappel, dans le cas du site MAG (915 m³/s - Fig. 9.5-a), le scénario proposé ici (scénario 2) repose sur une dépression de 147 m de largeur, faiblement marquée dans la topographie et divisée par un banc central. Les sondages sédimentaires et géophysiques ayant ciblé une zone plus réduite, aucune donnée de terrain ne renseigne la moitié SO de la section mouillée, qui a du être délimitée arbitrairement.

De même, sur le site CORD1 (1109 m³/s - Fig. 9.5-b), les sondages sédimentaires et géophysiques ont ciblé une zone large de 63 m sur la base d'un indice parcellaire alors qu'une dépression large de 180 m est visible sur le MNT. Là encore, la section mouillée a donc été prolongée (scénario 2) en conservant la profondeur moyenne mesurée sur la portion sondée.

Enfin, dans le cas du site CORD3 (988 m³/s - Fig. 9.5-b), la couverture des prospections électriques semble représentative de la dépression visible sur le MNT au niveau du point de sondage (103 m de largeur à plein bord). Toutefois, le fond du chenal n'est pas associé à

des valeurs de résistivité électrique fortes et la TRE présente des niveaux de valeur discontinus.

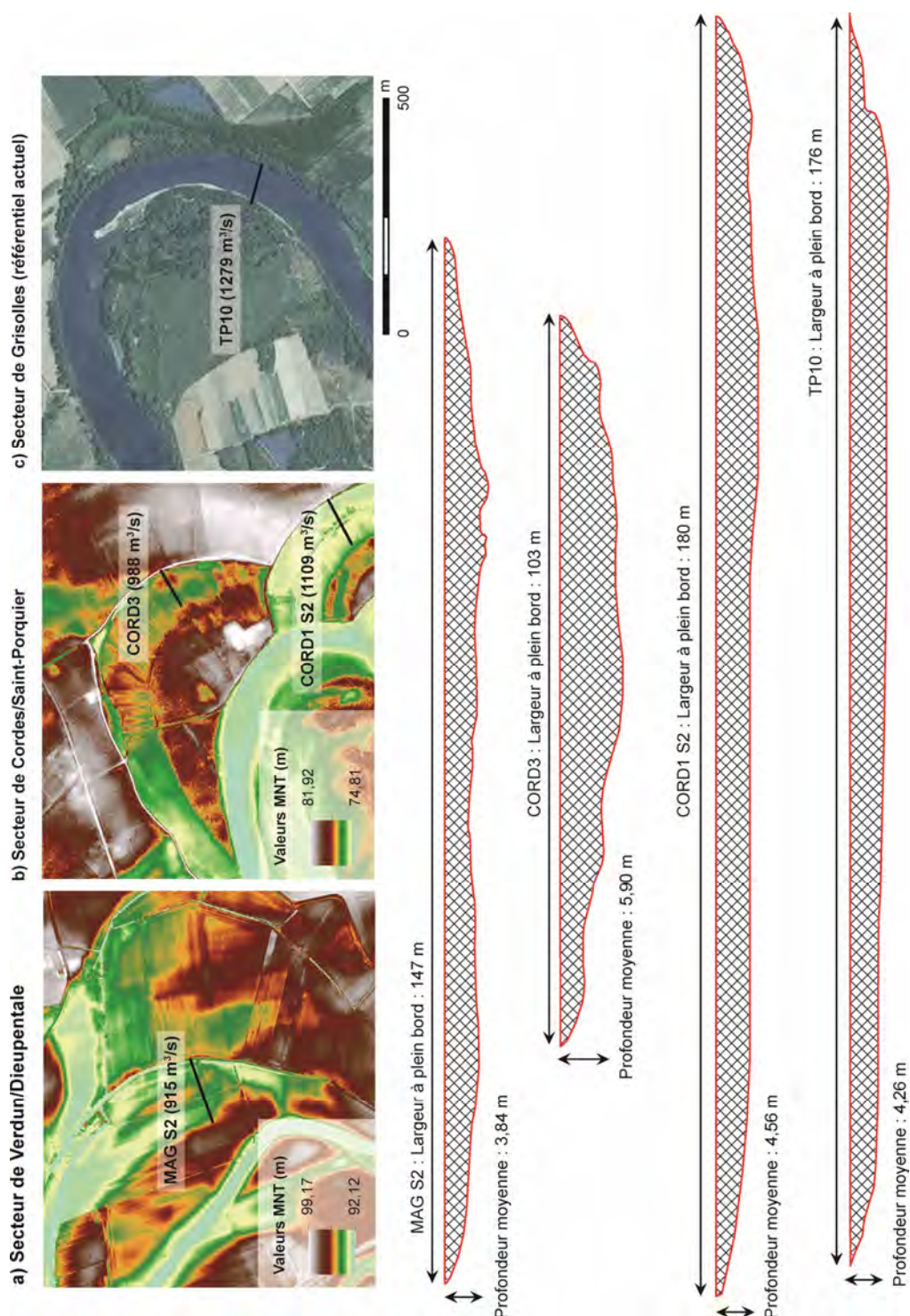


Figure 9.5 : Comparaison des sections mouillées à plein bord des chenaux du groupe 4 (débits à plein bord compris entre 900 et plus de 1100 m³/s) et du lit actuel de la Garonne au niveau de Grisolles (profil en travers d'après Sauvage, 1999 - pente utilisée pour le calcul du débit à plein bord : 0,0009 m/m).

9.1.2. Relation entre capacité hydraulique et période de fonctionnement des chenaux

Les éléments de datation concernant les paléochenaux sondés, obtenus à partir des cartes historiques pour les chenaux les plus récents et par datation ^{14}C réalisées sur des fragments organiques pour les formes les plus anciennes, permettent d'appréhender deux périodes distinctes : 1) des chenaux dont le début du remplissage peut être attribué au Moyen-Âge central (1000-1300 AD) et 2) des chenaux datés du XIX^e siècle, encore en eau sur les cartes historiques. Comme le montre la figure 9.6, il existe une bonne correspondance entre les âges de fonctionnement (ou fin de fonctionnement) des chenaux et leur capacité hydraulique estimée.

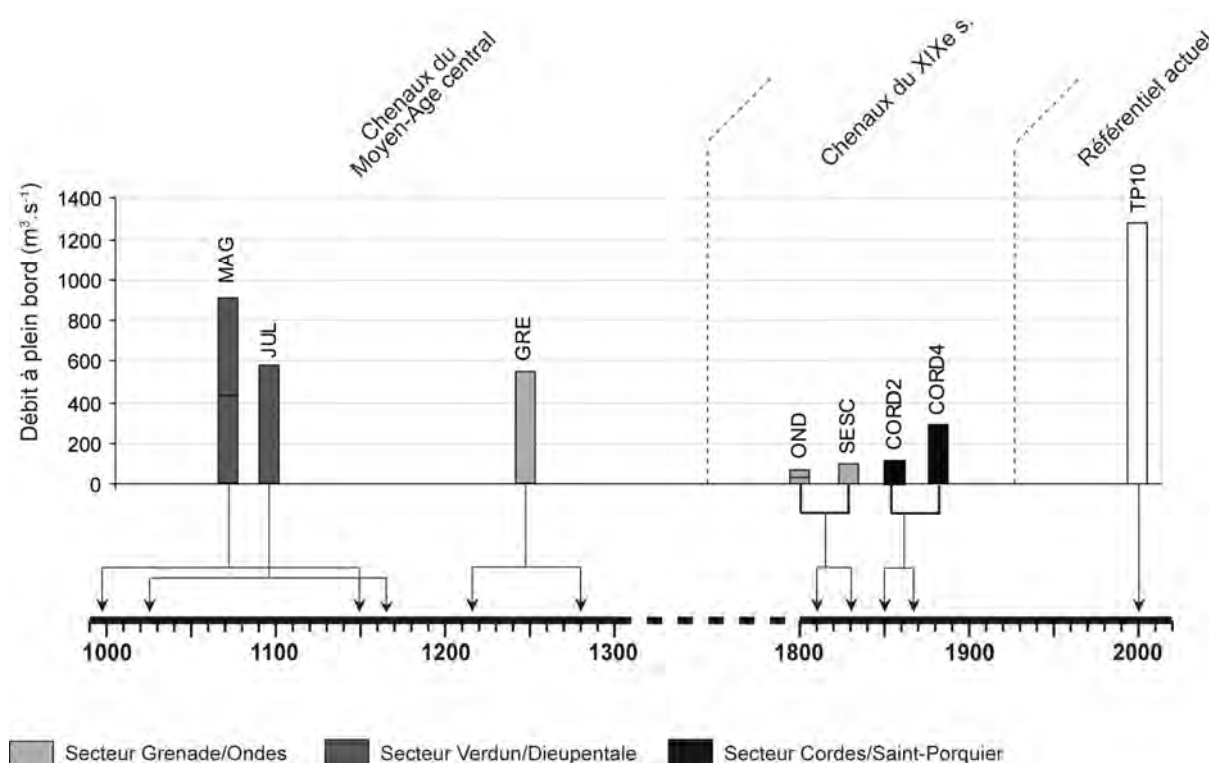


Figure 9.6 : Correspondance entre âge et capacité hydraulique des chenaux. Dans le cas de MAG et OND les deux scénarii proposés sont représentés. Les périodes attribuées aux chenaux MAG, JUL et GRE correspondent à l'intervalle de datation ^{14}C (2 sigma). Les périodes attribuées aux chenaux OND, SESC, CORD2 et CORD4 correspondent aux cartes sur lesquelles ils sont représentés en eau.

9.1.2.1. Les chenaux attribués au Moyen-Âge central

Au total, six points de sondage ciblaient des chenaux pour lesquels les cartes historiques ne fournissent aucun élément de datation. Parmi ces chenaux, le site GRE dans le secteur de Grenade/Ondes et les sites JUL et MAG dans le secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale ont fourni des fragments de bois prélevés à la base des carottes (entre 0,2 et plus de 1,2 m au dessus du fond), qui ont pu être datés par ^{14}C . Les dates obtenues attribuent le début du remplissage de ces formes au Moyen-Âge central (XI^e-XIII^e siècles - Fig. 9.6) : les fragments prélevés dans les chenaux MAG et JUL datent de la période comprise entre la fin du X^e siècle et la fin du XII^e siècle (respectivement 995-1150 et 1025-1165 cal. AD 2 sigma) ; le fragment de bois prélevé le plus en profondeur sur le site GRE date du XIII^e siècle (1215-1280 cal. AD 2 sigma).

Les paléochenaux GRE, JUL et MAG forment à eux trois le troisième groupe de la classification des capacités hydrauliques, avec des paléodébites à plein bord estimés entre 431 et 586 m³/s. Il faut toutefois rappeler qu'un second scénario a été envisagé pour le site MAG, à partir duquel le débit à plein bord estimé est supérieur (915 m³/s).

Il est impossible d'affirmer que les chenaux GRE, JUL et MAG aient été des chenaux uniques, toutefois, aucune forme visible sur les photographies aériennes ne laisse entendre qu'ils aient appartenu à des systèmes à chenaux multiples (e.g., Fig. 9.7). La gamme de valeur de débit à plein bord obtenue permet donc d'envisager des capacités hydrauliques plus réduites que l'actuel durant le Moyen-Âge central.

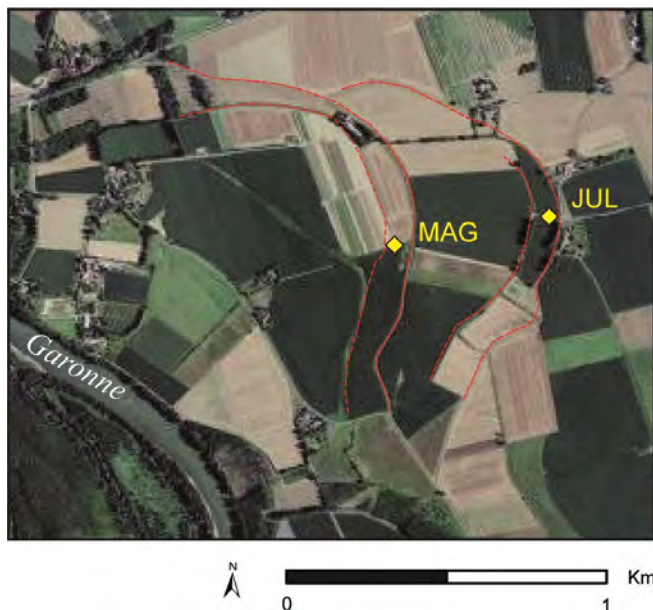


Figure 9.7 : Délimitation des paléochenaux JUL et MAG à partir d'une photographie aérienne (source : Géoportail).

9.1.2.2. Les chenaux du XIX^e siècle

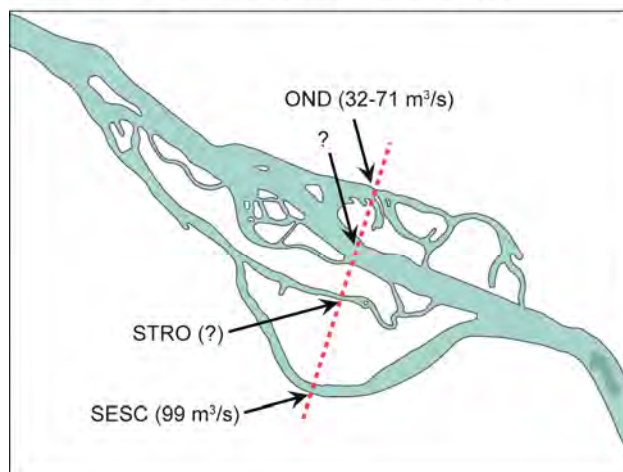
Au total, cinq points de sondage ciblaient des chenaux actifs au cours du XIX^e siècle : SESC, STRO et OND dans le secteur de Grenade/Ondes, qui correspondent à trois bras d'un complexe d'îles visible sur les cartes de 1833 et 1850 ; CORD2 et CORD4 dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier, qui correspondent à deux bras du méandre recoupé visible en eau sur la carte de 1850 et en phase de déconnexion sur la carte de 1868.

STRO n'a pas pu faire l'objet de mesures en raison d'un trop fort remaniement d'origine anthropique. Les formes mesurées sur les autres sites présentent des débits à plein bord réduits comparables, qui forment les groupes 1 et 2 de la typologie des capacités hydrauliques (Fig. 9.6). Les chenaux OND, SESC et CORD2 sont les formes qui présentent les débits à plein bord les plus réduits (groupe 1 : $32 < Q < 114$ m³/s). CORD4 est plus large et plus profond, avec un débit à plein bord estimé de 297 m³/s (groupe 2).

Ces débits réduits traduisent l'appartenance des chenaux ciblés à des systèmes à bras multiples. Toutefois, les débits à plein bord réels pour la période concernée ne peuvent pas être appréhendés car aucun complexe de bras n'a pu être mesuré dans son intégralité (Fig. 9.8). La somme des débits estimés conduit à un débit de 170 m³/s dans le secteur de Grenade/Ondes et 411 m³/s dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier, soit des débits à plein bord très nettement inférieurs à l'actuel. Deux explications peuvent être avancées : 1) une sous-estimation de la délimitation des sections mouillées (e.g., au niveau du site SESC une dépression de plus grande ampleur est visible sur le MNT - cf. Fig. 8.1) et/ou 2) une concentration importante des débits dans un chenal principal non appréhendé par les mesures de terrain (Fig. 9.8).

Dans le cas du chenal CORD4 en particulier, un débit plus important était attendu car ce méandre recoupé a auparavant fonctionné en chenal unique. Au regard de la section mouillée à plein bord, très nettement délimitée par des corps résistants sur la TRE CORD4.a (cf. Fig. 8.23), il est possible d'envisager que le chenal ait connu une migration latérale au cours de la phase de recouplement, associée à un ajustement progressif de sa largeur.

a) Secteur de Grenade/Ondes - carte de 1833



b) Secteur de Cordes/Saint-Porquier - carte de 1850

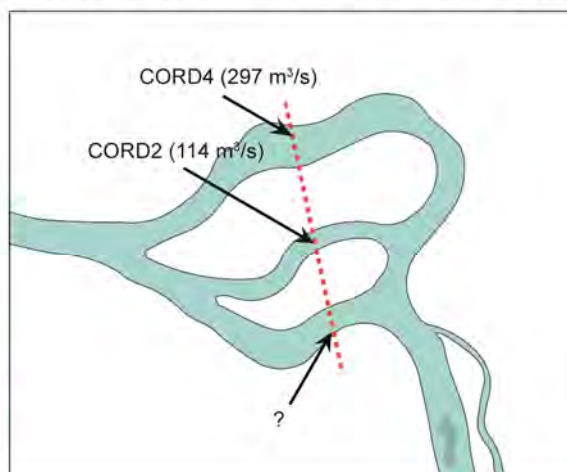


Figure 9.8 : Systèmes à chenaux multiples du XIX^e siècle dans les secteurs de Grenade/Ondes et Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier.

9.1.2.3. Les chenaux non datés

Deux chenaux du secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier ne sont renseignés par aucun élément de datation absolue : CORD1 et CORD3. Seuls deux éléments de chronologie relative, basés sur la superposition des formes, peuvent être rappelés : les chenaux CORD1 et CORD3 sont antérieurs à la période couverte par les cartes historiques, (1750-2000) et le chenal CORD3 est antérieur au chenal CORD1.

Ces formes composent le groupe 4 de la typologie des capacités hydrauliques, avec des débits à plein bord estimés qui se rapprochent de l'actuel : 988 m³/s dans le cas de CORD4 et 1109 m³/s dans le cas de CORD1 (scénario 2). Bien que ces mesures soient associées à une forte incertitude, leur proximité ainsi que la correspondance morphologique entre les deux formes permet d'envisager que les chenaux CORD1 et CORD3 aient pu fonctionner à des périodes relativement proches dans le temps.

Là encore, les formes visibles sur les photographies aériennes laissent entendre que ces chenaux ont fonctionné en chenal unique (Fig. 9.9).



Figure 9.9 : Délimitation des paléochenaux CORD1 et CORD3 à partir d'une photographie aérienne (source : Géoportail).

9.2. Phases de déconnexion

Le modèle dominant de remplissage des chenaux mis en évidence par l'analyse stratigraphique des carottes révèle deux phases (Fig. 9.10) : 1) une phase caractérisée par d'épais niveaux massifs et bioturbés à granulométrie fine en surface (faciès Fr) et 2) une phase caractérisée par des granulométries plus contrastées en profondeur, traduite par des niveaux lités (faciès FI ou Sh) ou des alternances de niveaux massifs moins épais (faciès Fm et Sm). Cette limite correspond au seuil entre enregistrements fluviaux et perturbation de l'organisation stratigraphique des niveaux de colmatage par les processus de pédogenèse (sol). La caractérisation et l'organisation des niveaux profonds (situés en dessous du faciès Fr) nous renseignent sur la phase de déconnexion des chenaux et l'amorce de leur comblement.

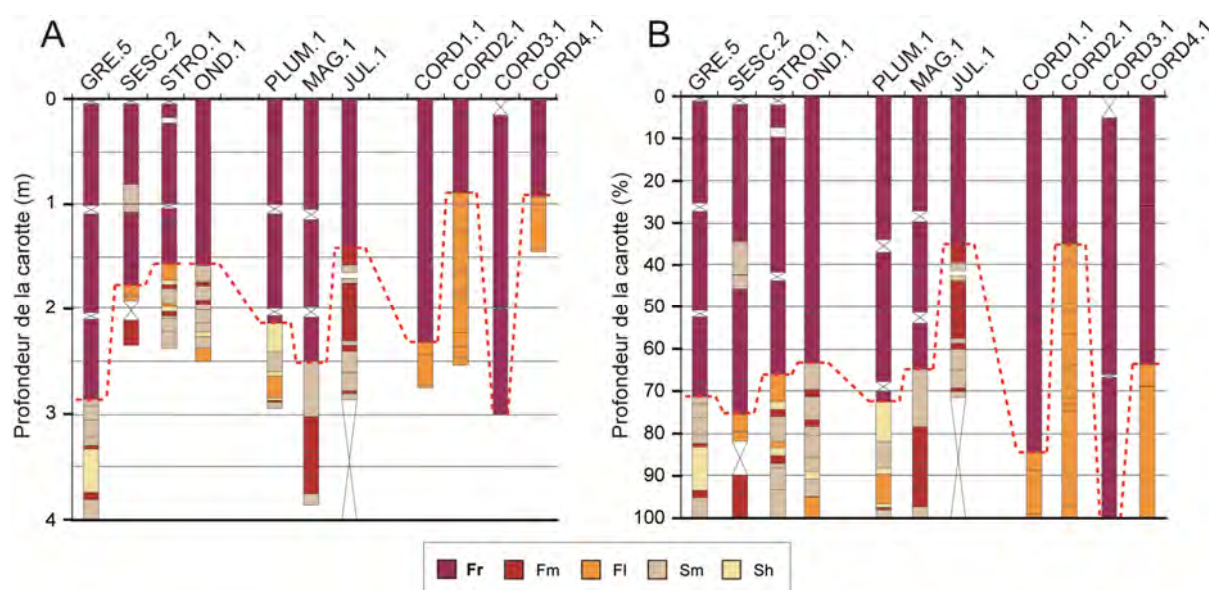


Figure 9.10 : Synthèse des logs sédimentaires. A - Profondeur en m. B - Profondeur en %.

9.2.1. Disparité spatiale des niveaux de remplissage

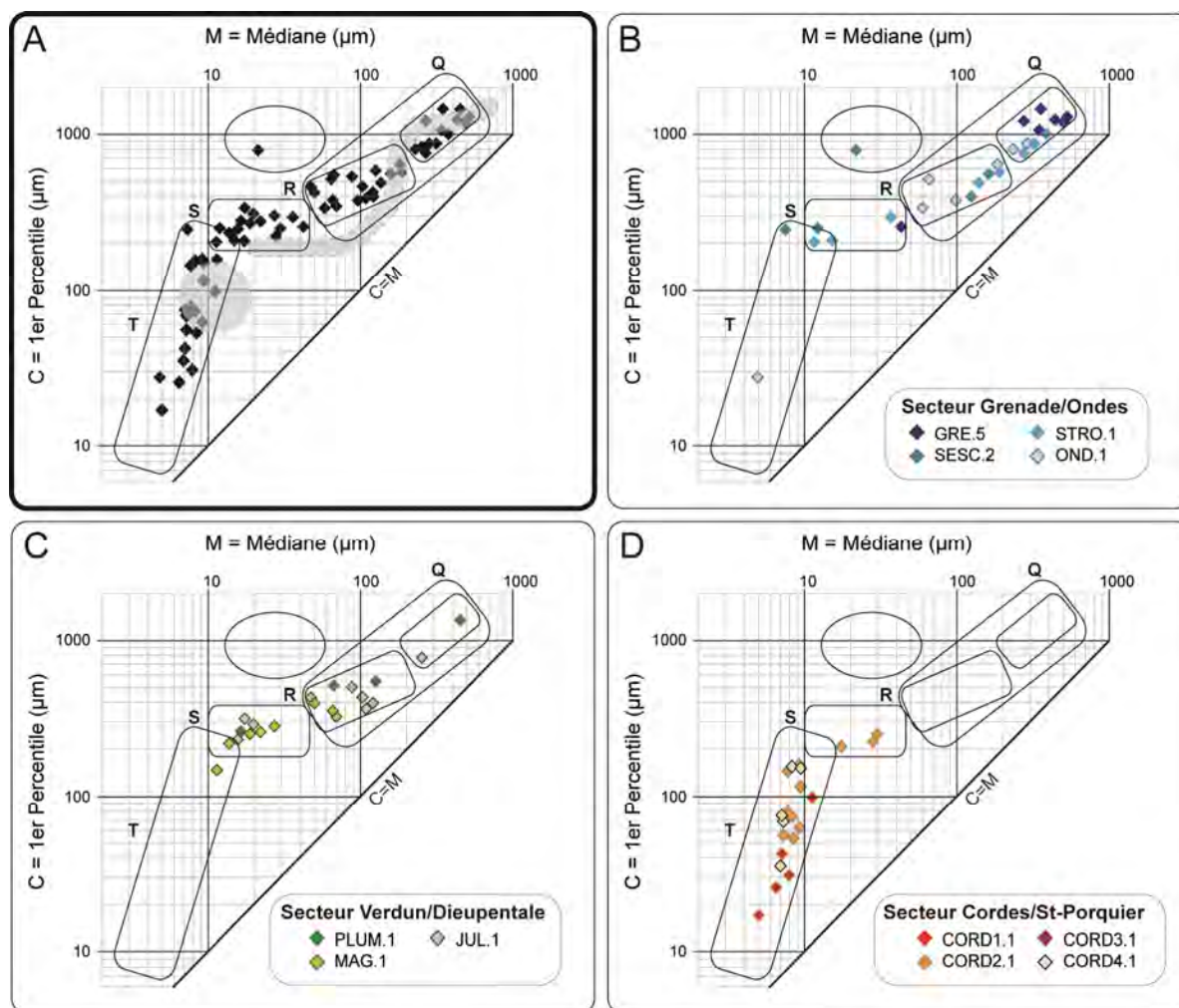
Dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier, seul le faciès FI (fines litées) est représenté (Fig. 9.10). Les échantillons prélevés dans ces niveaux sont particulièrement homogènes et se concentrent principalement dans le segment T de l'image CM (suspension pélagique - Fig. 9.11). Les échantillons prélevés dans la carotte CORD1.1 en particulier, sont responsables de la forme étirée du segment, avec des granulométries particulièrement fines. Seuls quelques échantillons des carottes CORD2.1 et CORD3.1 présentent des granulométries plus grossières, situées dans le segment RS (suspension uniforme). Cette homogénéité des niveaux profonds de colmatage traduit une phase relativement continue d'eau stagnante.

Au contraire, dans les secteurs de Grenade/Ondes et Verdun-sur-Garonne/Dieupentale, les faciès observés en profondeur sont diversifiés (Sm, Sh, Fm et FI - Fig. 9.10). Les échantillons de sédiments prélevés dans ces niveaux présentent des granulométries hétérogènes, qui se situent principalement dans les segments QR et RS de l'image CM, ainsi que dans la partie haute du segment T (Fig. 9.11). Seul un échantillon marginal prélevé dans la carotte OND.1 présente une granulométrie plus fine, située plus bas dans le segment T. Cette distribution révèle un large champs de processus de dépôts impliqués dans le remplissage des paléochenaux : suspension graduée (segment QR : transport dans la couche basse/turbulente de la colonne d'eau) ; suspension uniforme (segment RS : transport dans la partie moins turbulente/plus haute de la colonne d'eau) et suspension pélagique

(segment T : dépôts de décantation). Ces alternances de débit suggèrent que les bras morts ont connu une phase au cours de laquelle ils ont été régulièrement reconnectés au chenal principal ou inondés par les débordements du lit principal, et ont ainsi reçu des apports grossiers (sableux) à l'occasion des crues.

Par ailleurs, il apparaît que les carottes prélevées dans le secteur de Grenade/Ondes se caractérisent par une dominance des faciès sableux (Sm et Sh - Fig. 9.10) et par une forte concentration des échantillons mesurés au granulomètre laser dans la partie haute du segment QR (Fig. 9.11). En opposition, les carottes prélevées dans le secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale se caractérisent plutôt par des niveaux de type Fm (Fig. 9.10) et les échantillons prélevés se concentrent dans la partie basse du segment QR (Fig. 9.11). Sur la base de ces observations, il est donc possible d'envisager un gradient granulométrique amont/aval.

Il faut toutefois rester prudent concernant ce dernier point, étant donné qu'un mètre de sédiment fortement susceptible de correspondre à une phase sableuse a été perdu sur le site JUL (Fig. 9.10). Cette perte représente un point de concordance entre les deux chenaux médiévaux JUL et GRE, pour lesquels les séquences profondes n'ont pas pu être prélevées en raison de la faible cohérence des matériaux.



QR: suspension graduée; RS: suspension uniforme; T: suspension pélagique

Figure 9.11 : Projection des valeurs granulométriques D0,5 et D0,99 sur l'image CM pour les échantillons prélevés dans les niveaux profonds. A - Image CM globale. B - Image CM du secteur de Grenade/Ondes. C - Image CM du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale. D - Image CM du secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier.

9.2.2. Relation entre disparités spatiales des niveaux de remplissage, morphologie du chenal et disponibilité de la charge alluviale

Dans la littérature, les différences observées dans le mode d'alluvionnement des bras morts ont été associées à plusieurs facteurs de contrôle agissant à l'échelle locale (synthèse dans : Rollet, 2005 ; Le Coz, 2007) : 1) la morphologie du bras (rapport entre longueur du bras et longueur du chenal actif ; angle d'incidence à l'entrée du bras ; profondeur, largeur et pente du bras) ; 2) la position du bras par rapport au chenal actif ; 3) la fréquence et l'intensité des connexions hydrologiques ; 4) la concentration en matière en suspension ; 5) l'alimentation phréatique et 6) la dynamique végétale (*e.g.*, résistance à l'écoulement).

Le premier facteur envisagé pour expliquer les disparités observées entre les secteurs situés dans la zone médiane du linéaire et le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier, situé dans la zone aval, est la morphologie des bras morts. En effet, il a été démontré que la sédimentation fine dans les plans d'eau est plus intense lorsque la sinuosité du chenal recoupé est supérieure à celle du nouveau chenal (Shields et Abt, 1989 ; De Heer et Mosselman, 2004). Or, les paléochenaux sondés visibles en eau sur les cartes du XIX^e siècle, présentent des degrés de sinuosité différents d'un secteur d'étude à l'autre. Dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier (Fig. 9.12), le chenal CORD4 correspond à un méandre recoupé par deux bras (recoupement par déversements successifs, Lewin, 1983 ; Lewis et Lewin, 1983 ; Bravard, 1983 ; Rollet et al., 2005), dont le premier correspond au chenal CORD2. Ceci implique que les bras en question ont atteint un seuil de sinuosité maximale (Stølum, 1996, 1998 ; Micheli et Larsen, 2010). En opposition, dans le secteur de Grenade/Ondes, les chenaux SESC, STRO et OND correspondent à des bras secondaires en contexte de tressage ponctuel, qui présentent des tracés plus rectilignes (Fig. 9.13).

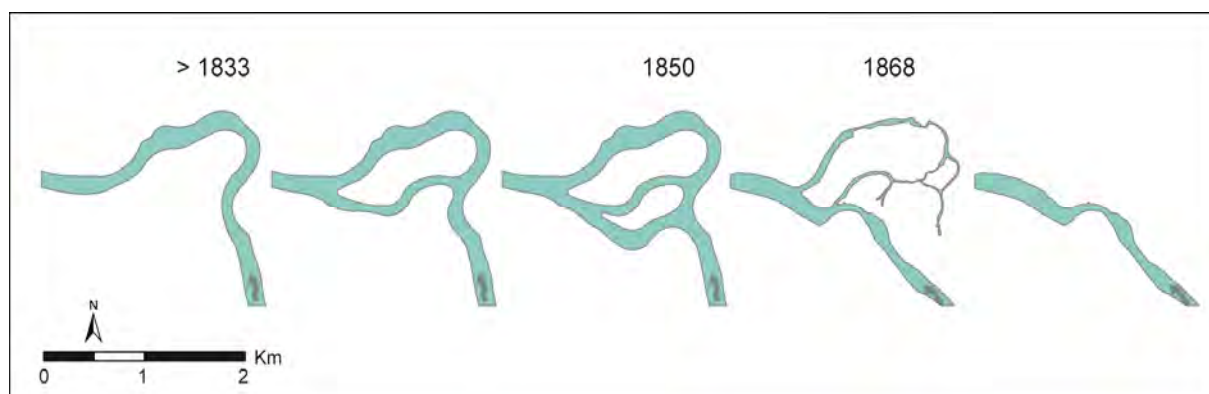


Figure 9.12 : Modèle de recoupement du méandre de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier entre les années 1830 et la fin des années 1860.

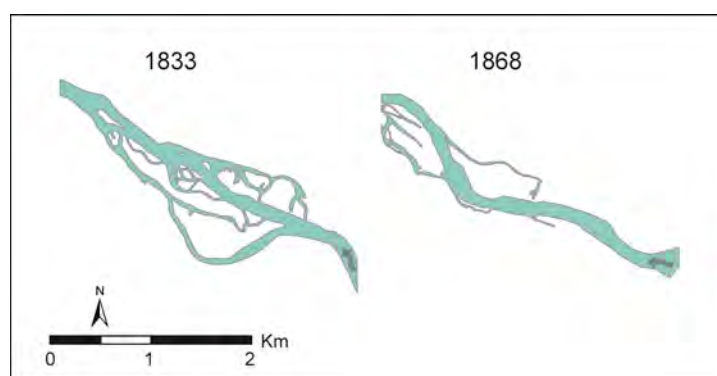


Figure 9.13 : Modèle de déconnexion des bras du système à chenaux multiples du secteur de Grenade/Ondes entre les années 1830 et les années 1860.

La distance aux confluences des principaux affluents représente un second facteur susceptible d'expliquer les différences de remplissage observées entre les trois secteurs sondés. Les secteurs de la zone médiane, particulièrement Grenade/Ondes, sont en effet sous influence directe des confluences de l'Hers et de la Save, susceptibles de fournir une charge sableuse notable en période de crue, tandis que le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier est relativement isolé, à 25 km à l'aval de la Save.

Par ailleurs, la disponibilité de la charge sableuse au sein du bassin versant peut être envisagée comme facteur de contrôle des disparités observées au sein d'un même secteur d'étude. En effet, la présence d'épaisses séquences de sédiment peu cohérent en profondeur dans les paléochenaux médiévaux GRE et JUL peut être envisagée comme le signe d'une réduction globale de la charge sableuse disponible depuis le Moyen-Âge central.

9.3. Evolution des chenaux post-déconnexion

L'absence d'eau et le développement d'un sol dans les chenaux sondés montre qu'ils ont tous connu un processus de terrestrialisation. Toutefois, les résultats montrent que les différentes formes n'ont pas toutes atteint le même stade d'évolution.

Les formes les plus anciennes, *i.e.*, les chenaux médiévaux (GRE, MAG et JUL) et les chenaux non datés (CORD1 et CORD3) ont toutes atteint un stade avancé de comblement (90% ou plus de la section mouillée à plein bord est comblé - Fig. 9.14-A). Parmi ces formes, les chenaux qui ont pu être datés sont aussi associés à des vitesses de sédimentation réduites, comprises entre 0,30 et 0,47 cm/an (Fig. 9.14-B). Ces valeurs sont toutefois discutables étant donné que la date de fin de remplissage n'est pas connue (surestimation de la période de remplissage). A l'exception du paléochenal JUL, les formes les plus anciennes se caractérisent enfin par des niveaux de faciès Fr particulièrement épais (2,2 à 3 m d'épaisseur - Fig. 9.14-C).

En opposition, les formes les plus récentes, *i.e.*, les chenaux visibles en eau sur les cartes du XIX^e siècle (OND, SESC, CORD2 et CORD4) sont encore nettement marquées dans la topographie de surface, avec des stades de comblement de l'ordre de 38 à 79% (Fig. 9.14-A). Seul le site OND fait exception, ce qui peut s'expliquer par une alimentation plus fréquente en charge alluviale, due à la proximité du bras au lit actif, et/ou par la profondeur réduite de ce chenal. Par ailleurs, les formes les plus récentes présentent les vitesses de comblement les plus rapides, comprises entre 0,95 et 1,24 cm/an (Fig. 9.14-B), ainsi que les faciès Fr les moins développés (0,9 à 1,9 m - Fig. 9.14-C).

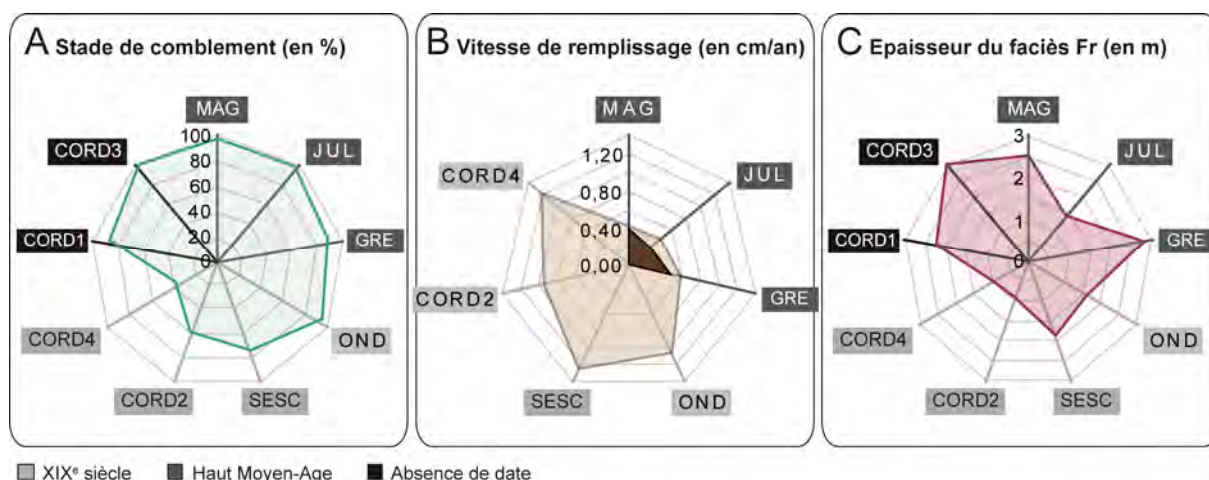


Figure 9.14 : Indices d'évolution des paléochenaux. A - Stade de comblement. B - vitesse de sédimentation. C - Epaisseur concernée par le faciès Fr.

9.4. Discussion autour du phénomène d'incision

Au terme de cette analyse des données de terrain, nous avons tenu à observer les relations distance/altitude entre les paléochenaux sondés et le lit actuel de la Garonne, afin d'appréhender le phénomène d'incision reconnu à l'échelle du linéaire (Beaudelin, 1989 ; Steiger et al., 1998). Pour chaque paléochenal : 1) la distance en ligne droite entre le point central de la section mouillée à plein bord et le lit actuel a été mesurée sous SIG ; 2) l'altitude du fond a été calculée à partir de l'épaisseur moyenne de remplissage et des valeurs altitudinales issues du MNT. Par ailleurs, l'altitude du fond du lit actuel a été calculée pour chacun des trois secteurs d'étude à partir de profils topographiques issus des travaux de Sauvage (1999).

Les résultats montrent d'abord que les chenaux les plus anciens correspondent aux chenaux les plus éloignés du lit actuels (Fig. 9.15). Cette donnée peut être interprétée comme l'indice d'une meilleure conservation des archives antérieures au XIX^e siècle sur les marges de la basse plaine inondée régulièrement), moins concernée par les divagations du lit.

Par ailleurs, à deux exceptions près (CORD3 et CORD4), tous les chenaux sondés sont perchés par rapport au lit actuel (Fig. 9.15), ce qui traduit bien un phénomène d'incision du chenal. A priori, les chenaux les plus anciens semblent légèrement plus bas (positionnement entre 1,1 et 2,7 m au dessus du fond) que les chenaux les plus récents (positionnement entre 1,5 et 3,1 m au dessus du fond). Toutefois, l'implication à la fois de chenaux secondaires et de chenaux uniques complique l'interprétation des valeurs d'altitude en terme de degré d'incision.

Dans le secteur de Grenade/Ondes (Fig. 9.15-A), le chenal le plus ancien (GRE) se situe à 1,1 m au dessus du fond actuel. Les autres chenaux sont à une altitude relative supérieure (1,5 à 3,1 m), qui peut être attribuée à la faible profondeur de ces chenaux (chenaux secondaires). Le chenal OND est particulièrement perché (3,1 m), ce qui peut dépendre d'une sous-estimation de sa profondeur (section mouillée extrapolée) ou d'une capacité hydraulique réellement inférieure aux autres chenaux du système à bras multiple auquel il appartient.

Dans le secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale, les chenaux médiévaux JUL et MAG se situent à 1,5 m au dessus du fond actuel. Cette position relative est comparable à celle estimée sur le site GRE, ce qui suppose une incision du lit de la Garonne de l'ordre de 1 à 1,5 m depuis le Moyen-Âge central. Le niveau résistant rencontré sur le site PLUM se situe nettement plus haut (3,2 m), ce qui semble cohérent étant donné qu'aucun corps dépressionnaire n'a été observé sur ce site.

Dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier, les résultats sont plus hétérogènes. Le fond du paléochenal estimé au niveau du site CORD3 se situe à plus d'1 m en dessous du fond actuel, ce qui suggérerait un phénomène d'exhaussement du lit de la Garonne depuis sa déconnexion. Cette donnée révèle que les niveaux conducteurs observés sur ce site sont probablement bien des niveaux molassiques. Toutefois, elle révèle aussi la probabilité d'une délimitation erronée de la section mouillée à plein bord, conduisant à une surestimation du paléodébit à plein bord sur ce site. Aucun élément de datation n'étant disponible pour ce site, il est difficile de proposer une interprétation plus poussée. Le second chenal non daté (CORD1) est quant à lui nettement perché au dessus du fond actuel (2,7 m), ce qui suggérerait une incision plus marquée dans ce secteur, ou encore une fois, un biais dans la délimitation du fond du chenal. Les chenaux les plus récents et proches du chenal actuel (CORD2 et CORD4) présentent des encaissements tout aussi discordants. Le fond du chenal CORD2 se situe au même niveau que celui du chenal CORD1 (2,8 m), ce qui suggère une incision récente forte dans ce secteur ou traduit la faible profondeur du chenal de recoupement CORD2. En opposition, le chenal CORD4 se situe quasiment au même niveau que le chenal actuel, ce qui peut traduire : 1) une érosion régressive étant donné que le site CORD4 se situe à proximité de la connexion aval du paléochenal et qu'une zone

d'érosion régressive a été détectée à proximité sur le MNT ou 2) la faiblesse de l'incision dans ce secteur.

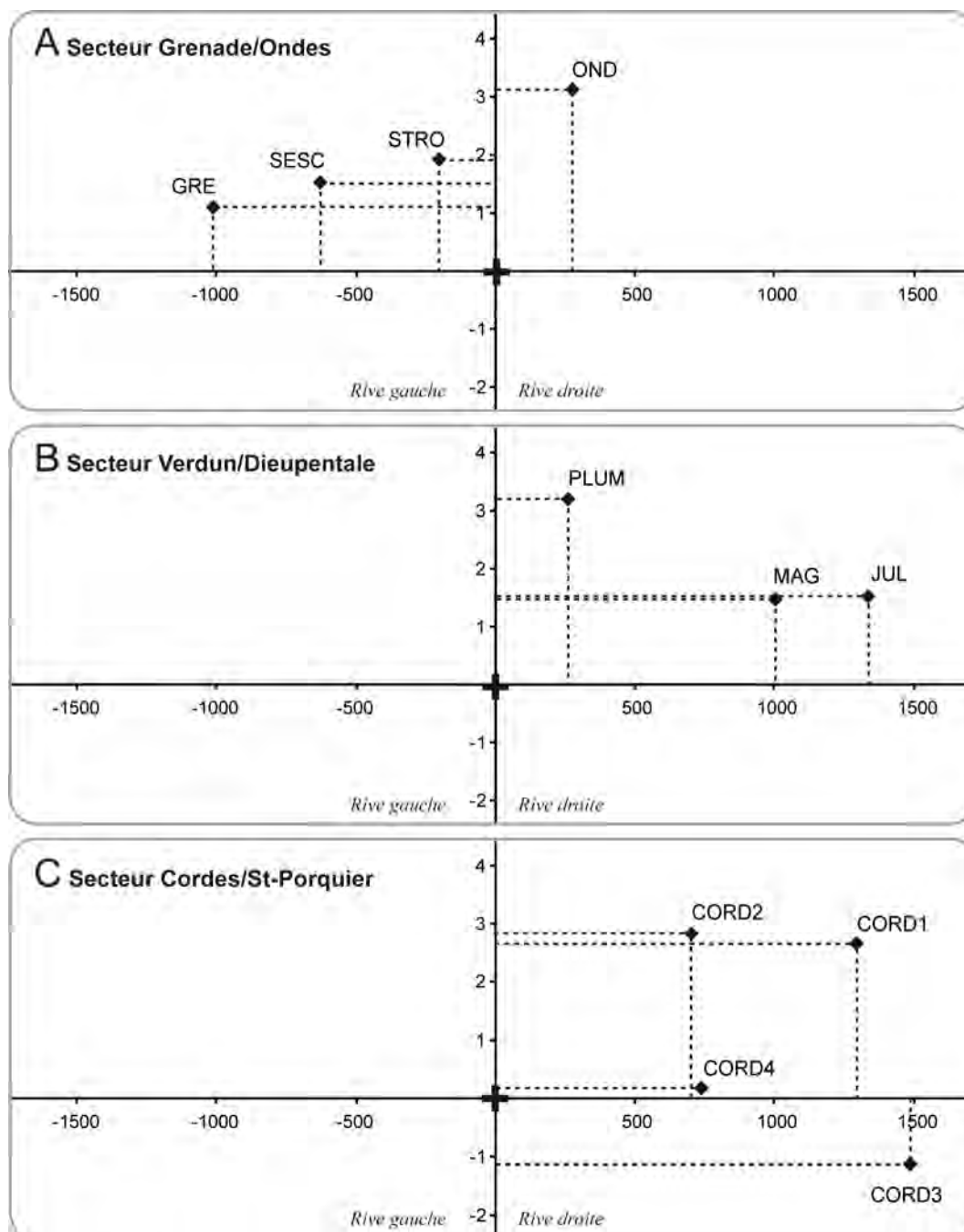


Figure 9.15 : Position des paléochenaux par rapport au lit actuel (altitude/distance).

9.5. Conclusion du chapitre 9

A partir des données de terrain recensées sur les sites d'étude des secteurs de Grenade/Ondes, Verdun-sur-Garonne/Dieupentale et Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier, trois temps de l'histoire des paléochenaux sondés ont pu être abordés :

- 1) *La capacité hydraulique des chenaux actifs* : Les chenaux se caractérisent tous par des capacités hydrauliques estimées inférieures à l'actuel. Toutefois quatre groupes peuvent être individualisés et associés à des périodes de fonctionnement

distinctes : les groupes 1 et 2 correspondent aux chenaux des systèmes à bras multiples du XIX^e siècle, pour lesquels des débits à plein bord très réduits ont été estimés ($< 300 \text{ m}^3/\text{s}$) ; le groupe 3 correspond à trois chenaux des secteurs de Grenade/Ondes et Verdun-sur-Garonne/Dieupentale, attribués au Moyen-Âge central ($400\text{-}600 \text{ m}^3/\text{s}$) et le groupe 4 correspond à deux formes du secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier qui n'ont pas pu être datées et pour lesquelles les débits à plein bord estimés s'approchent de l'actuel ($1000\text{-}1110 \text{ m}^3/\text{s}$). Pour ces derniers, les valeurs sont toutefois associées à une forte incertitude en raison d'une délimitation difficile des sections mouillées à plein bord. De même, il existe une incertitude concernant le chenal médiéval MAG, qui selon le scénario envisagé, se positionne dans le groupe 3 ou dans le groupe 4.

- 2) *La phase de déconnexion* : Les niveaux de remplissage profonds, qui correspondent aux premiers stades de comblement après déconnexion, diffèrent entre les secteurs situés dans la partie médiane du linéaire et le secteur situé dans la zone aval. Dans la zone amont, les chenaux présentent en effet des faciès sédimentaires diversifiés et une granulométrie hétérogène, qui suggèrent des apports notables à l'occasion des crues, tandis que dans la zone aval la finesse de la granulométrie et l'homogénéité des faciès suggèrent plutôt une longue période d'eau stagnante. Deux facteurs ont été proposés pour expliquer ces disparités : 1) la forte sinuosité des chenaux du secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier et 2) la proximité des secteurs de Grenade/Ondes et Verdun-sur-Garonne aux confluences de l'Hers et de la Save. Un gradient granulométrique amont/aval plus global semble se dégager, ce qui soutiendrait l'hypothèse d'un effet de la distance des chenaux aux confluences de l'Hers et de la Save sur le mode de remplissage des chenaux. Par ailleurs, des séquences sédimentaires peu cohésives particulièrement épaisses caractérisent les chenaux médiévaux GRE et JUL, ce qui pourrait traduire une charge sableuse disponible accrue au Moyen-Âge central.
- 3) *Le comblement des chenaux post-déconnexion* : Les formes les plus anciennes ont atteint un degré de comblement maximal et se caractérisent par des niveaux de faciès Fr (sol) très épais (2,2 à 3 m). En opposition, les formes les plus récentes sont encore bien inscrites dans le paysage (les niveaux de remplissage occupent entre 38 et 79% de la surface des sections mouillées à plein bord) et se caractérisent par des épaisseurs de faciès Fr moindres (0,9 à 1,9 m). Les vitesses de sédimentation pour ces sites sont de l'ordre de 0,95 à 1,24 cm/an.

Par ailleurs, les formes les plus anciennes semblent préférentiellement conservées sur les marges de la bassure (basse plaine inondée régulièrement), ce qui est susceptible de traduire une forte dynamique latérale depuis leur déconnexion. En outre, à deux exceptions près, tous les paléochenaux sondés sont perchés par rapport au lit actuel, sans nette logique d'âge dans le degré de perchage, ce qui traduit l'incision relativement récente du chenal (post XIX^e siècle) et permet de proposer une valeur d'incision de 1 à 1,5 m depuis le Moyen-Âge central.

Conclusion de la Partie 3

Dans le cadre du second volet de cette étude, centré sur les paléochenaux de la Garonne, trois secteurs particulièrement dynamiques ont fait l'objet de travaux de terrain le long de la Garonne toulousaine : Grenade/Ondes, Verdun-sur-Garonne et Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier.

Au sein de chacun de ces secteurs, trois à quatre sites d'étude supposés correspondre à des paléochenaux ont été sondés :

- GRE, SESC, STRO et OND dans le secteur de Grenade/Ondes
- PLUM, MAG et JUL dans le secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale
- CORD1, CORD2, CORD3 et CORD4 dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier.

Certains de ces sites correspondent à d'anciens chenaux représentés en eau sur les cartes historiques du XIX^e siècle (SESC, STRO et OND ; CORD2 et CORD4). Les autres sites correspondent à des formes concaves inscrites dans le parcellaire (visibles sur les photographies aériennes) et supposées antérieures à la période couverte par les cartes historiques (1750-2000).

Sur chaque site, plusieurs données ont été collectées : une ou plusieurs carottes sédimentaires, une tomographie de résistivité électrique (TRE) et un profil topographique. Un modèle numérique de terrain (MNT) haute résolution (1 m) couvrant la vallée de la Garonne a en plus été acquis au terme de la campagne de terrain.

Le croisement de ces données a permis d'identifier clairement neuf paléochenaux de la Garonne. Une analyse de la géométrie 3D de leurs sections mouillées à plein bord et une étude approfondie des remplissages sédimentaires ont révélé trois types de chenaux :

- 1) des boucles de méandre intégralement comblées, datées du Moyen-Âge central et marquées par un paléodébit à plein bord de l'ordre de 400 à 600 m³/s, (voire 915 m³/s selon le scénario envisagé), par une vitesse de sédimentation réduite (0,30 à 0,47 cm/an), ainsi que pour certains, par des phases sableuses grossières en profondeur ;
- 2) des chenaux de systèmes à bras multiples du XIX^e siècle, marqués par un stade de comblement moins avancé, par des vitesses de sédimentations supérieures (0,95 à 1,24 cm/an), ainsi que par des sections mouillées réduites et des paléodébites à plein bord très faibles (< 300 m³/s) ;
- 3) des chenaux de plus grande ampleur, marqués par une capacité hydraulique relativement proche de l'actuel (plus de 900 à 1100 m³/s), qui sont associés à une forte incertitude en terme de mesure de la section mouillée à plein bord et pour lesquels aucun élément de datation absolue n'a été trouvé.

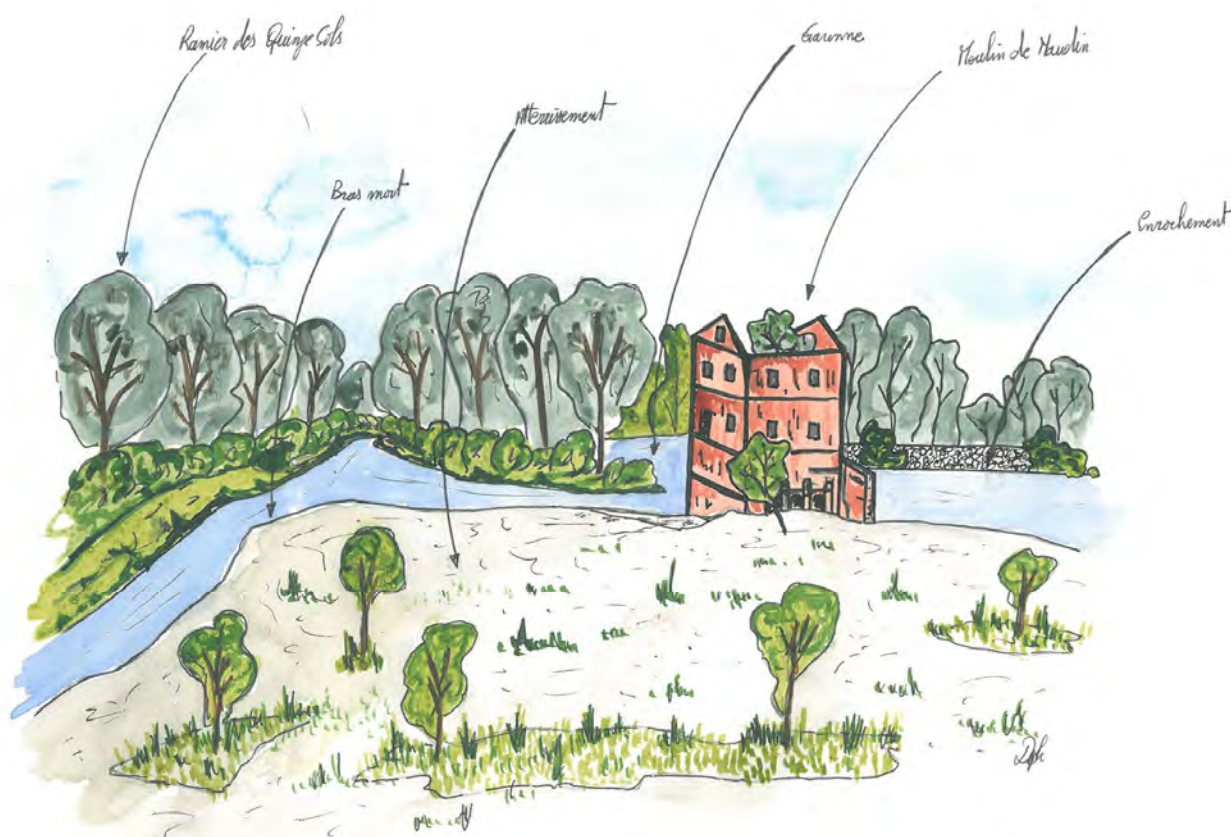
Des valeurs de puissance spécifique comprises entre 6 et 60 w/m² ont aussi été calculées. Toutefois, cet indice n'a finalement pas été exploité en raison de sa forte dépendance à deux valeurs elles-mêmes associées à une incertitude notable (le débit et la pente).

Par ailleurs, l'analyse des niveaux de remplissage a révélé une disparité spatiale entre les sites des différents secteurs, traduite par un gradient granulométrique amont/aval dans les niveaux profonds. Cette disparité a été associée à deux facteurs de contrôle potentiels : 1) la morphologie des chenaux et 2) la distance aux sources de fourniture alluviale.

Enfin, l'analyse du positionnement des différents paléochenaux par rapport au chenal actuel a révélé une incision du lit apparemment relativement récente (post-XIX^e) et une concentration des archives les plus anciennes en marge de la basse plaine.

Partie 4 – Trajectoire d'évolution de la Garonne toulousaine : synthèse et discussion

L'objectif de cette partie est de proposer une synthèse et une discussion des résultats issus de cette étude. Une reconstitution de la trajectoire d'évolution de la dynamique fluviale de la Garonne toulousaine est d'abord proposée à partir du croisement des données issues de l'analyse des cartes historiques et des données de terrain (Chapitre 10). A partir de ce modèle d'évolution, les facteurs de contrôle susceptibles d'expliquer le changement sont ensuite discutés (Chapitre 11). Enfin, la trajectoire d'évolution de la Garonne toulousaine est comparée aux données issues de la littérature scientifique sur les autres cours d'eau européens (Chapitre 12).



Philippe et Delphine Valette

Chapitre 10. - Reconstitution de la trajectoire d'évolution de la Garonne toulousaine à partir du croisement des données géohistoriques et stratigraphiques

L'objectif de ce chapitre est de proposer une synthèse de l'évolution de la dynamique fluviale de la Garonne toulousaine au cours des derniers siècles, à partir du croisement des données issues de l'analyse des documents cartographiques historiques et des travaux de terrain menés sur une dizaine de paléochenaux de la Garonne (11 sites sondés / neuf paléochenaux clairement identifiés). Les principaux apports de chacune des deux méthodes sont d'abord rappelés (1). La trajectoire d'évolution du linéaire fluvial est ensuite reconstituée (2).

10.1. Principaux apports de chacune des démarches méthodologiques mises en œuvre

Le travail mené sur les cartes historiques a permis de mettre en évidence un linéaire segmenté, marqué par quatre modes de fonctionnement hydro-sédimentaire distincts jusqu'à la fin du XIX^e siècle (Fig. 10.1-A). A partir de la fin du XIX^e siècle / du début XX^e siècle, un phénomène progressif d'homogénéisation et de simplification du linéaire a été observé (Fig. 10.1-A) et quantifié.

Le travail mené sur les paléochenaux de la Garonne a d'abord permis d'allonger la période d'étude en intégrant des chenaux datés du Moyen-Âge central (Fig. 10.1-B). Ce travail a ensuite révélé des disparités en termes de capacité hydraulique et de stade d'évolution, entre ces formes anciennes et des formes plus récentes, datées du XIX^e siècle (Fig. 10.1-B). Des disparités en termes de mode de déconnexion et remplissage sédimentaire ont par ailleurs été observées entre les chenaux sondés dans la zone médiane du linéaire (secteurs de Grenade/Ondes et Verdun-sur-Garonne/Dieupentale) et les chenaux sondés dans la zone aval (Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier ; Fig. 10.1-B). Des indices de l'incision récente du lit de la Garonne ont aussi été détectés.

10.2. Reconstitution de la trajectoire d'évolution

Cette étude a permis d'appréhender trois périodes de l'histoire de la Garonne toulousaine : 1) le Moyen-Âge central ; 2) les XVIII^e-XIX^e siècles et 3) le XX^e siècle. Malgré nos efforts, la période comprise entre la fin du XIII^e siècle et la fin du XVIII^e siècle n'a pas pu être documentée.

10.2.1. La Garonne toulousaine au Moyen-Âge central

La période médiévale est renseignée par trois paléochenaux, situés dans la zone médiane (Z3) de la Garonne toulousaine (un paléochenal du secteur de Grenade/Ondes et deux paléochenaux du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale - Fig. 10.1-B). Ces chenaux ont été attribués au Moyen-Âge central par datation ¹⁴C de macrorestes végétaux (brindille ou petite branche), prélevés à la base des carottes (entre 0,2 et plus de 1,2 m au dessus du fond). Les dates obtenues permettent d'attribuer le début du colmatage des bras aux XI^e-XII^e siècles dans le secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale et au XIII^e siècle dans le secteur de Grenade/Ondes.

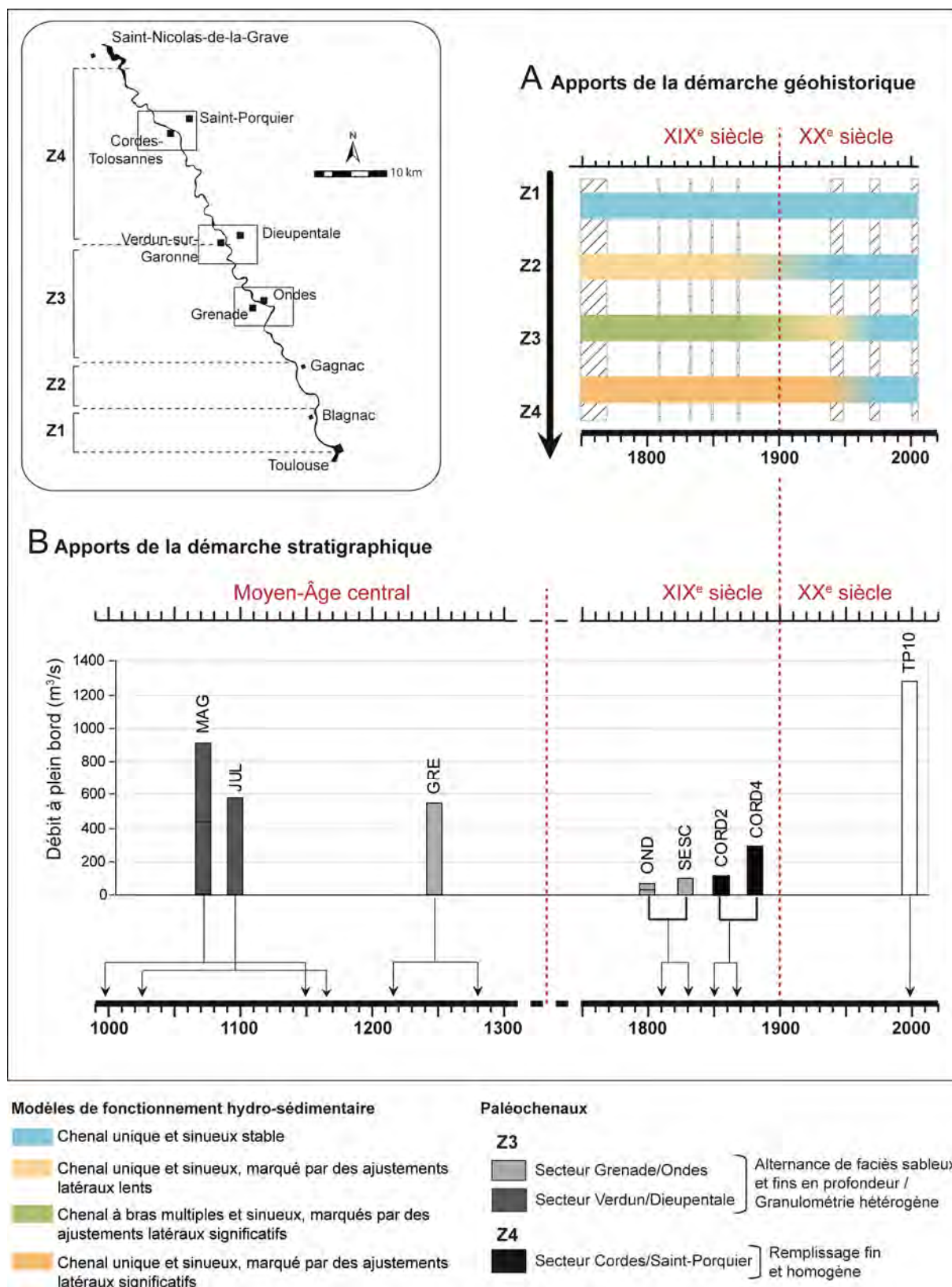


Figure 10.1 : Principaux apports des approches géohistorique (A) et stratigraphique (B).

Au regard du parcellaire, du modèle numérique de terrain (MNT) et des tomographies de résistivité électrique (TRE), ces bras semblent correspondre à des chenaux uniques, susceptibles d'être ponctuellement divisés par des bancs alluviaux. Les mesures de géométrie hydraulique sur ces chenaux, associées à une estimation de la pente locale du chenal à partir de profils longitudinaux de la fin des années 1980, permettent d'estimer un paléodébit à plein bord de l'ordre de 400 à 600 m³/s, pouvant atteindre jusqu'à 915 m³/s dans le cas du second scénario proposé pour MAG (Fig. 10.1-B). Bien que ces valeurs soient associées à une marge d'incertitude notable, leur ordre de grandeur permet d'envisager une capacité hydraulique très inférieure à l'actuel (1279 m³/s). Les épaisses séquences sableuses observées ou perdues dans les niveaux profonds de remplissage de ces chenaux, permettent en outre d'envisager une charge sableuse abondante à cette période.

10.2.2. La Garonne toulousaine aux XVIII^e et XIX^e siècles

Entre la fin du XIII^e siècle et le début du XIX^e siècle, il existe une réelle carence en termes de données historiques relatives à la dynamique fluviale de la Garonne, ainsi qu'en termes de données de terrain, ce qui est plus inattendu. En effet, aucune information concernant cette période n'a été apportée par nos données de terrain et seule une carte historique issue de notre corpus fournit une image du fleuve au cours du XVIII^e siècle (~1750-1770).

En opposition, le XIX^e siècle est renseigné à la fois par les cartes historiques (1810, 1833, 1850 et 1868) et par les données issues des travaux de terrain menés sur cinq paléochenaux de la Garonne (Fig. 10.1).

Le travail mené sur les cartes historiques a mis en évidence un linéaire segmenté jusqu'à la fin du XIX^e siècle, marqué par quatre modes de fonctionnement hydro-sédimentaire distincts (Fig. 10.1-A). La zone amont Z1, sur les communes de Toulouse et Blagnac (7 km), se caractérise par un chenal unique et sinueux stable, marqué par la seule présence de longues îles, séparées de la berge par des chenaux étroits. La zone Z2, entre Blagnac et Gagnac (7 km), présente encore une morphologie fluviale relativement simple, toutefois, une évolution latérale du chenal par le biais d'ajustements lents y est observée. La zone médiane Z3, située entre Gagnac et Verdun-sur-Garonne (19 km), présente un chenal à bras multiples séparés par de grandes îles. Cette zone se caractérise par une forte instabilité/mobilité latérale des chenaux. Enfin, la zone aval Z4, entre Verdun-sur-Garonne et Saint-Nicolas-de-la-Grave (30 km), présente à nouveau un chenal unique et sinueux, qui s'individualise par une forte instabilité/des ajustements latéraux significatifs.

Cette segmentation a été expliquée par la morphologie de la vallée et l'organisation du réseau hydrographique. Le gradient longitudinal d'instabilité du chenal peut en effet être associé à la transition entre régime montagnard et régime de plaine au niveau de Toulouse-Portet, qui se traduit par un élargissement de la basse plaine et donc de l'espace de divagation potentiel du chenal. La multiplication ponctuelle des bras dans la zone Z3 peut par ailleurs être mise en relation avec la présence des confluences de l'Hers et de la Save, susceptibles d'avoir fourni une charge alluviale abondante en période de crue et d'avoir ainsi généré la formation d'atterrissements à l'origine d'une division du chenal. La dynamique de méandrage peut donc être vue comme le comportement dominant du linéaire, localement perturbé par des discontinuités le long de l'hydrosystème fluvial.

Parmi les cinq paléochenaux sondés attribués au XIX^e siècle (Fig. 10.1-B), trois correspondent à un système à bras multiples dans le secteur de Grenade/Ondes (zone médiane Z3), visible en eau sur les cartes de 1810 et 1833. Les deux autres correspondent à un système de méandre en phase de recouplement dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier (zone aval Z4), visible en eau sur la carte de 1850 et partiellement déconnecté sur la carte de 1868. Les paléodébites à plein bord estimés pour chacun de ces chenaux (excepté sur le site STRO où aucune mesure n'a pu être effectuée),

sont très réduits, tous inférieurs à 120 m³/s (Fig. 10.1-B). Toutefois, les systèmes n'ont pas pu être mesurés dans leur intégralité, ce qui limite la comparaison avec le régime actuel.

Une forte disparité a été observée entre les niveaux de remplissage des chenaux sondés dans la zone médiane (Z3) et ceux des chenaux sondés dans la zone aval (Z4 - Fig. 10.1-B). Les chenaux de la zone médiane se caractérisent en effet par une alternance de faciès sableux et fins en profondeur, interprétés comme l'enregistrement d'une phase au cours de laquelle le bras-mort a été régulièrement reconnecté au chenal actif ou alimenté par ses débordements. En opposition, dans la zone aval, les chenaux sont essentiellement colmatés par des niveaux massifs de décantation, qui indiquent qu'ils n'ont pas reçu d'apports grossiers après déconnexion. Cette différence de comportement a été attribuée à un facteur morphologique (sinuosité) et/ou géographique (distance aux confluences de l'Hers et de la Save susceptibles de fournir une charge sableuse abondante). Elle est en bon accord avec la segmentation mise en évidence par l'analyse des cartes historiques.

10.2.3. La Garonne toulousaine au XX^e siècle

Le XX^e siècle est principalement renseigné par les cartes historiques (Fig. 10.1-A). Quelques informations supplémentaires ont toutefois pu être tirées de l'étude des paléochenaux.

L'analyse des cartes révèle une homogénéisation et une simplification globales du linéaire au cours de cette période, qui se traduit par trois processus dominants : 1) l'évacuation et la végétalisation des bancs alluviaux (réduction de 88% des surfaces en banc entre 1868 et les années 2000) ; 2) l'érosion et le rattachement à la berge des îles (réduction de 90% des surfaces en île entre 1868 et les années 2000), notamment dans la zone médiane (Z3) et 3) la stabilisation du chenal (taux de migration maximal = 20 m/an au cours de la période 1868-1970 et 7 m/an au cours de la période 1970-2000), particulièrement nette dans les zones médiane (Z3) et aval (Z4), qui correspondent aux zones les plus instables.

Cette évolution a été remarquée dès la fin du XIX^e siècle / le début du XX^e siècle dans les zones amont (Z1 et Z2) et médiane (Z3) et à partir de la moitié du XX^e siècle dans la zone aval (Z4 - Fig. 10.1-A).

Aujourd'hui, la Garonne toulousaine dans son intégralité se caractérise par un chenal unique et sinueux stable. Dans la plaine, les chenaux déconnectés au cours du XIX^e siècle sont encore relativement marqués dans la topographie. Les chenaux médiévaux, conservés sur les marges de la bassure (basse plaine inondée régulièrement), sont totalement colmatés et ne sont plus visibles que dans le parcellaire et plus ponctuellement, dans la morphologie de la limite de la bassure. Le niveau du fond de ces chenaux, perché par rapport au fond actuel, confirme le phénomène d'incision du lit, observé dans les études précédentes.

10.3. Conclusion du chapitre 10

Le croisement des données issues de l'analyse des cartes historiques et du sondage de neuf paléochenaux de la Garonne a permis de reconstituer la trajectoire d'évolution de la Garonne toulousaine depuis le X^e siècle, avec un gap dans les données entre la fin du XIII^e siècle et la fin du XVIII^e siècle.

Trois temps de l'histoire de la dynamique fluviale de la Garonne toulousaine ont ainsi été appréhendés :

- 1) *Le Moyen-Âge central (entre les X^e et XIII^e siècles)* : cette période, renseignée par des données de terrain relativement fragmentaires, semble se caractériser par un hydrodynamisme réduit, qui se traduit par un chenal unique, des paléodébits à plein bord inférieurs à l'actuel et une charge sableuse abondante.
- 2) *Les XVIII^e et XIX^e siècles (1750-1868)* : cette période, renseignée à la fois par les cartes historiques et par les données de terrain, se caractérise par une tendance dominante au méandrage, au sein de laquelle quatre modes de fonctionnement hydro-sédimentaire distincts ont été détectés et attribués à des disparités en termes d'alimentation en charge sédimentaires et largeur de la basse plaine le long du linéaire.
- 3) *Le XX^e siècle (1868-2000)* : cette période, principalement renseignée par les cartes historiques, se caractérise par une réduction globale de la dynamique fluviale. Ce phénomène se traduit par une simplification et une homogénéisation du linéaire, observées dès la fin du XIX^e siècle / le début du XX^e siècle dans les zones amont et médiane (33 km de linéaire) et à partir des années 1940-1970 dans la zone aval (30 km de linéaire).

Chapitre 11. - De l'identification d'une rupture à la recherche d'événements perturbateurs

Ce chapitre vise à établir des relations entre les ruptures identifiées dans la trajectoire d'évolution de la Garonne toulousaine et les événements anthropiques et/ou climatiques connus, susceptibles d'avoir joué un rôle dans les changements observés. La période comprise entre le Moyen-Âge central et le XIX^e siècle, correspondant au Petit Âge Glaciaire (PAG), est d'abord abordée (1). Le phénomène de simplification et d'homogénéisation du linéaire, observé au cours du XX^e siècle, est ensuite discuté à la lumière des chroniques hydro-climatiques et de l'évolution des usages du fleuve (2).

11.1. Des archives sédimentaires du Moyen-Âge central à celles du XIX^e siècle : Où est passé le Petit Âge Glaciaire (PAG) ?

La trajectoire évolutive présentée précédemment suggère un changement de dynamique fluviale entre : 1) un modèle médiéval (XI^e-XIII^e siècles) caractérisé par un chenal unique, une capacité hydraulique inférieure à l'actuel et une charge sableuse abondante et 2) un modèle daté du XIX^e siècle, marqué par des chenaux multiples à capacité hydraulique très faible (Fig. 11.1-A).

Nous disposons de peu de données concernant les actions humaines susceptibles d'avoir impacté la dynamique fluviale de la Garonne au cours de cette période. La chronique des anomalies de température (Mann, 2002 ; Mann et al., 2009 - Fig. 11.1-B) permet par contre d'établir des liens :

- 1) entre le modèle de chenal unique à capacité hydraulique réduite associé au Moyen-Âge central (1000-1300) et la période correspondant à l'Optimum Climatique Médiéval (OM, 900-1300), identifiée dans la littérature comme une période marquée par des températures clémentes (Mann, 2002 ; Mann et al., 2009 - Fig. 11.1-B) et des crues rares et/ou peu dommageables (Champion, 1863), propices à une certaine stabilité des chenaux (Bravard, 1989) ;
- 2) entre le modèle de chenaux multiples faiblement encaissés du XIX^e siècle et la phase terminale du Petit Âge Glaciaire (PAG, 1400-1900), décrit dans la littérature comme une période relativement froide (Mann, 2002 ; Mann et al., 2009 - Fig. 11.1-B) et humide, marquée par la multiplication des phénomènes de crue (Champion, 1863), propice au développement d'un modèle fluvial plus dynamique, susceptible de former des chenaux multiples (Bravard, 1989).

L'absence de données concernant la période comprise entre le Moyen-Âge central et le XVIII^e siècle concorde ainsi avec le PAG à proprement parler et pourrait donc être la conséquence directe de l'hydrodynamisme qui caractérise cette période (remobilisation des archives à l'occasion des crues).

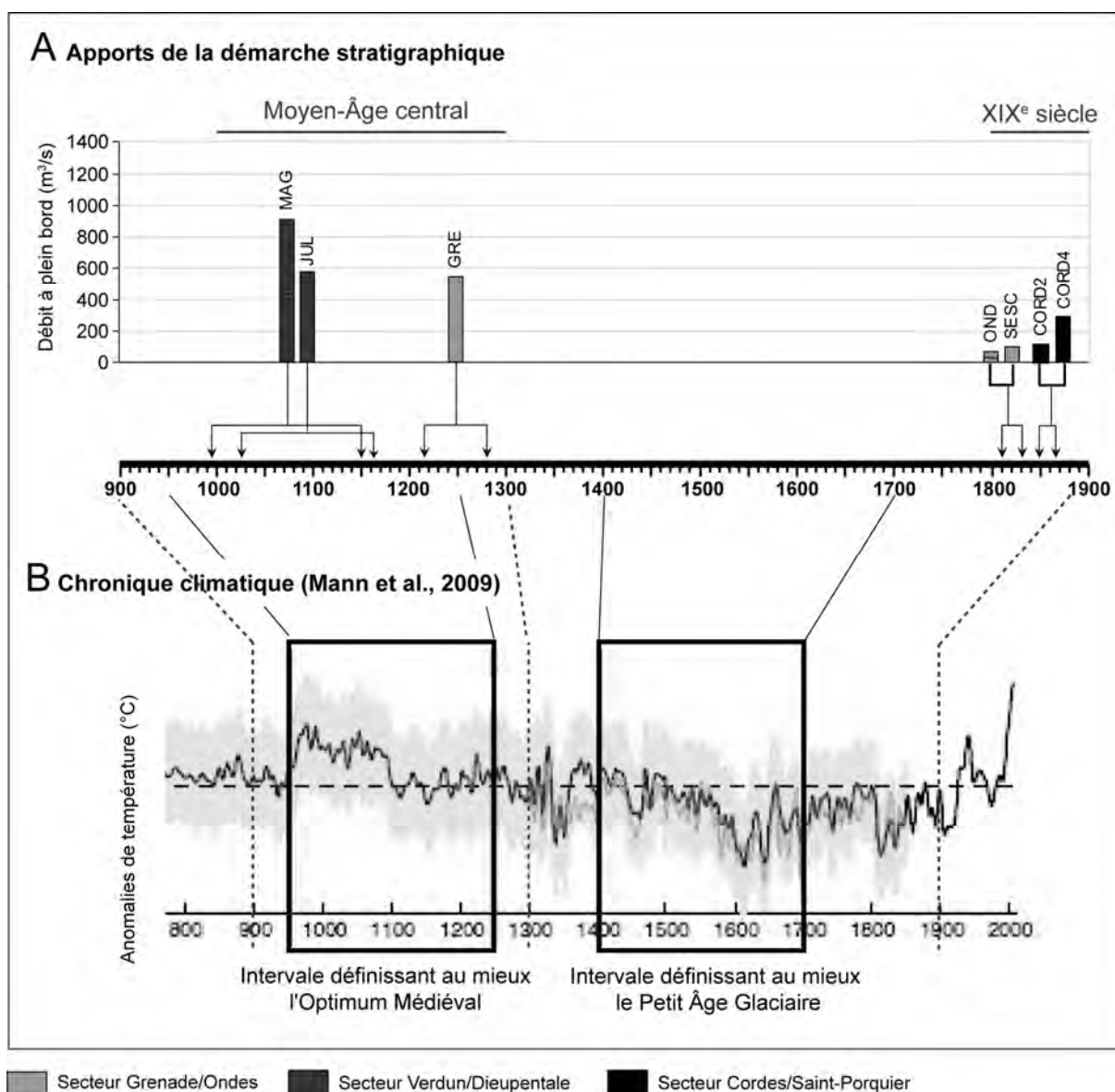


Figure 10.2 : Relation entre données stratigraphiques issues des travaux de terrain menés sur une série de paléochenaux de la Garonne toulousaine (A) et chronique climatique (B - Anomalies de température - Mann et al., 2009).

11.2. Le phénomène de simplification et d'homogénéisation du linéaire au cours du XX^e siècle : une conséquence de l'activité humaine sur le chenal et dans le bassin versant

Dans la ville de Toulouse, le lit de la Garonne a de longue date été modifié par les interventions humaines (Décamps et al., 1989). A l'aval du pont neuf (Z1 - Fig. 11.2-A), le rattachement progressif des îles à la berge entre 1868 et les années 1970 peut là encore être attribué à un facteur anthropique. La fin de l'activité meunière au début du XX^e siècle a en effet conduit à la déconnexion des canaux de fuite, causant le rattachement d'une île à la berge dès la fin des années 1910 (île de Tounis - Arrouy, 2005). Le rattachement à la berge plus tardif des dernières îles concorde ensuite avec la mise en place de digues à l'amont et à l'aval de la ville, suite à la crue de 1952.

Entre Blagnac et Verdun-sur-Garonne (Z2 et Z3), la fin de l'activité meunière ne peut pas être envisagée parmi les facteurs de contrôle de la modification du linéaire observée dès le début du XX^e siècle (Fig. 11.2-A), car l'installation de moulins fixes a historiquement été empêchée à l'aval de Toulouse par l'instabilité du chenal (Valette, 2002). Les interventions sur le lit visant à favoriser la navigation et/ou gagner des terres sur le fleuve (e.g., mise en place de traînées en travers des bras secondaires pour forcer la terrestrialisation) ne peuvent non plus être envisagées comme facteur de contrôle dominant, car ces pratiques ont pris fin à la fin du XIX^e siècle (Fig. 11.2-B). Par contre, la réduction de l'hydraulicité, traduite par la chronique des hauteurs d'eau (Fig. 11.2-C) et attribuée à la transition entre le Petit Âge Glaciaire (PAG) et le Réchauffement Global (RG), pourrait expliquer : 1) la stabilisation des formations alluviales exondées dans la zone Z2 (colonisation par la végétation) et 2) la déconnexion des bras secondaires dans la zone Z3. Outre la réduction des processus d'érosion et des apports alluviaux, cette évolution du régime de crue a aussi pu favoriser l'effet des derniers aménagements ponctuels, visant à faciliter la navigation et/ou gagner du terrain sur le fleuve (Fig. 11.2-B). Une incision du chenal, liée aux extractions artisanales de granulats en lit mineur (Fig. 11.2-B) et/ou à la réduction de la fourniture alluviale par la mise en place des premiers barrages (Fig. 11.2-B) et la reforestation des versants, est susceptible de conduire aux mêmes processus. Toutefois, si le chenal semble stabilisé dès les années 1940 dans la zone Z2, les migrations latérales du chenal entre 1868 et les années 1940 révèlent une faible emprise de ce phénomène dans la zone médiane Z3.

Alors que dans les zones amont (Z1 et Z2) le lit de la Garonne semble stabilisé dès les années 1940, dans la zone médiane (Z3), une réduction de la dynamique fluviale est encore observée entre les années 1940 et les années 1970 (Fig. 11.2-A), avec la disparition des bancs latéraux et la stabilisation du chenal. Cette évolution plus tardive peut être vue comme le signe du maintien, voire de l'intensification du phénomène d'incision, lié à l'industrialisation des extractions en lit mineur, à l'intensification des prélèvements d'eau pour l'irrigation et à l'augmentation du nombre de barrages et seuils en amont (Fig. 11.2-B). Simultanément, la rupture tardive observée dans la zone aval (Z4 - Fig. 11.2-A), entre Verdun-sur-Garonne et Saint-Nicolas-de-la-Grave, peut très clairement être attribuée à la campagne de travaux menée dans le Tarn-et-Garonne entre 1960 et 1984 (Fig. 11.2-B), qui a généré la stabilisation du lit et a par là même limité la recharge alluviale via l'érosion latérale (Steiger et al., 1998).

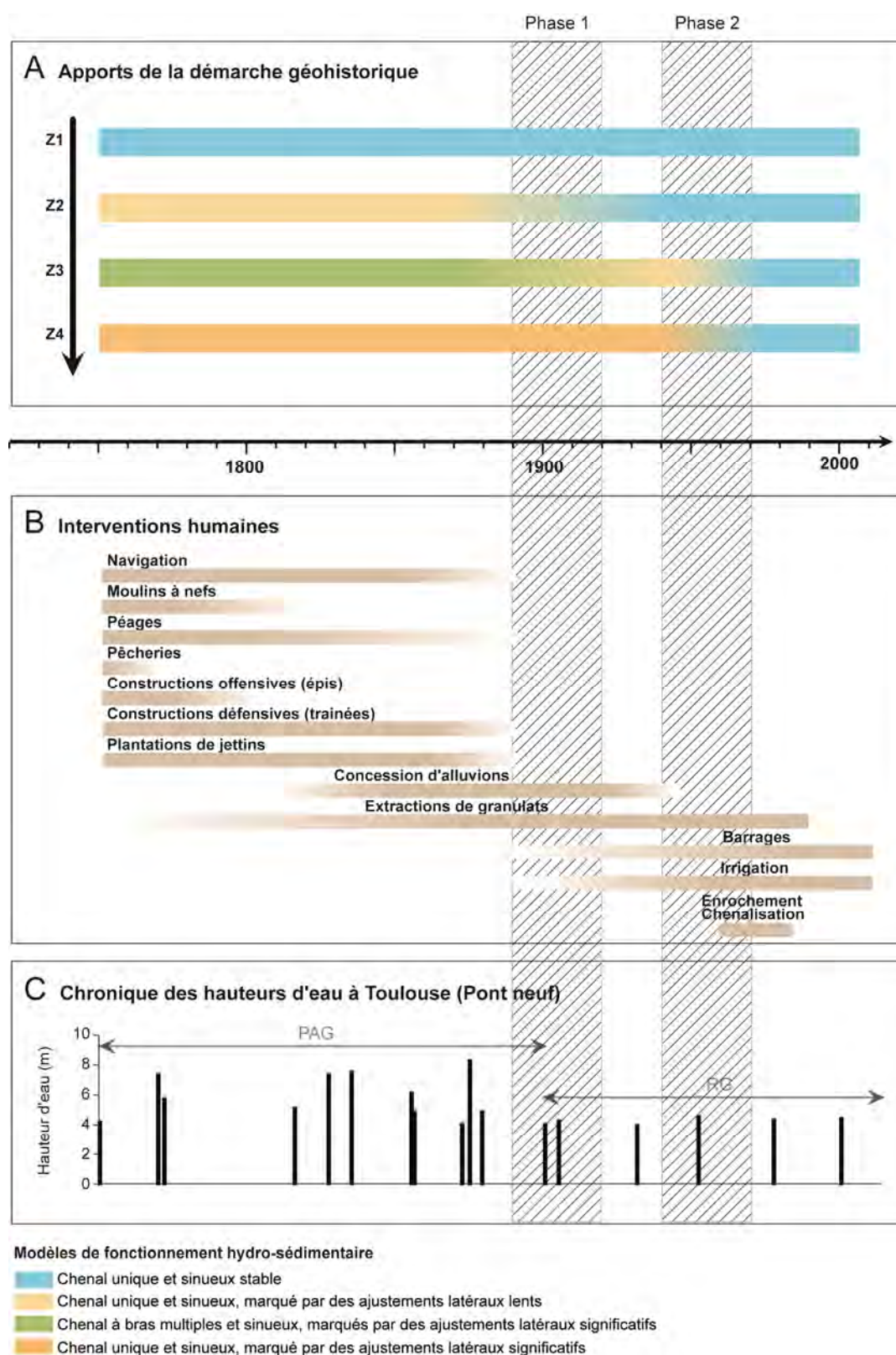


Figure 11.2 : Facteurs de contrôle de l'évolution de la dynamique fluviale de la Garonne toulousaine au cours du XXe siècle. A - Apports de la démarche géohistorique. B - Interventions humaines susceptibles d'avoir eu un effet sur la dynamique fluviale de la Garonne toulousaine (modifié d'après Valette, 2013). C - Chronique des hauteurs d'eau à la station de Toulouse Pont neuf (sources : HYDRO ; Serret, 1874 ; Pardé, 1928 ; Laffont, 1997). Phase 1 : amorce de la réduction de la dynamique fluviale dans les zones amont et médiane. Phase 2 : amorce de la réduction de la dynamique fluviale dans la zone aval.

11.3. Conclusion du chapitre 11

Trois niveaux de forçage sont envisagés pour expliquer l'évolution de la dynamique fluviale de la Garonne toulousaine au cours des 1000 dernières années :

A l'échelle locale, des interventions humaines de faible ampleur sont impliquées dans plusieurs changements observés au cours du XX^e siècle :

- la fermeture de canaux de fuite (fin de l'activité meunière) et la mise en place de digues localisées (amont et aval immédiat de Toulouse) permettent d'expliquer la disparition progressive des îles dans la ville de Toulouse (Z1) au cours de la période 1868-1970 ;
- les interventions ponctuelles sur le lit visant à améliorer la navigation et/ou à gagner des terres sur le fleuve (e.g., mise en place de traînées pour forcer le comblement des bras secondaires), sont susceptibles d'avoir contribué à la fin du modèle fluvial à chenaux multiples observé dans la zone médiane (Z3), à la fin du XIX^e siècle / au début du XX^e siècle ;
- les extractions artisanales de granulats en lit mineur ont pu générer des zones d'incision localisées dès la fin du XIX^e siècle / le début du XX^e siècle, amorçant la stabilisation du chenal dans certains secteurs (notamment dans la zone amont Z2).

Des facteurs à *emprise régionale*, tels que les extractions industrielles de sédiment en lit mineur, la mise en place de barrages dans la zone amont du bassin versant et la campagne de protection des berges menée dans le Tarn-et-Garonne entre 1960 et 1984, permettent d'expliquer le phénomène plus global de simplification et stabilisation du chenal au cours de la seconde moitié du XX^e siècle.

Les changements climatiques, opérés à l'échelle globale, permettent enfin d'expliquer la différence observée entre les chenaux du Moyen-Âge central et ceux du XIX^e siècle (transition entre OM et PAG), ainsi que la simplification du chenal dans les zones amont (Z2) et médiane (Z3) à la fin du XIX^e siècle / au début du XX^e siècle (transition entre PAG et RG).

Chapitre 12. - Mise en perspective des données produites sur la Garonne toulousaine à l'échelle européenne

A la lumière de la trajectoire historique reconstituée précédemment, l'objectif de ce chapitre est d'amorcer une comparaison entre la Garonne toulousaine et d'autres cours d'eau européens, afin d'évaluer si son évolution s'inscrit dans une tendance globale ou si elle se positionne comme atypique. Les trois périodes sondées sont successivement abordées, avec : 1) la question de l'enregistrement de l'Optimum Climatique Médiéval (OM) et de la transition OM/Petit Âge Glaciaire (PAG) ; 2) le XIX^e siècle ou la phase terminale du PAG et 3) l'ajustement du XX^e siècle en contexte d'intensification des activités humaines et de transition climatique entre PAG et Réchauffement Global (RG). Une quatrième phase de reprise hydro-sédimentaire, principalement reconnue sur les cours d'eau italiens, est enfin abordée (4).

12.1. L'enregistrement de l'Optimum Climatique Médiéval (OM) et de la transition OM/Petit Âge Glaciaire (PAG)

Les éléments de bibliographie concernant les caractéristiques morphosédimentaires des chenaux au cours de l'OM sont relativement fragmentaires. Il en ressort généralement un style fluvial à chenal unique, tendant vers le méandrage (Bravard, 1989 ; Bravard et Magny, 2002 ; Scapozza et Oppizzi, 2013 ; Lescure, 2015). Ce modèle concorde avec les données recensées sur la Garonne toulousaine, pour laquelle les chenaux médiévaux sondés semblent correspondre à des chenaux uniques.

La crise hydrologique marquant la transition entre OM et PAG identifiée à partir des sources historiques (Champion, 1863), se traduit généralement au niveau géomorphologique par une aggradation des lits (Jorda, 1980 ; Peiry, 1986, 1988 ; Bravard, 1989) et une transition du style à méandre vers des styles plus dynamiques, principalement le tressage (Bravard, 1989). Cette métamorphose fluviale n'a pas été observée sur la Garonne toulousaine, en raison de données pour l'instant encore lacunaires (cf. Table 11.1).

12.2. Les chenaux du XIX^e siècle et la phase terminale du PAG

En opposition aux Moyen-Âge central et bas Moyen-Âge, la période moderne a fait l'objet d'un grand nombre d'études, facilitées par la multiplicité des archives disponibles (cartes historiques). Sur la plupart des cours d'eau, le XIX^e siècle, qui correspond à la phase finale du PAG (Mann, 2002), se caractérise par une tendance au tressage. Cette tendance a été très largement observée dans le domaine circum-alpin, *i.e.*, dans le bassin du Rhône et dans le nord de l'Italie (Fig. 12.1). Elle se retrouve aussi sur le Rhin et le Danube (Tricart et Bravard, 1991) ; la Loire (Grivel, 2008 ; Grivel et Gautier, 2012) ; dans le sud de l'Italie (Scorpio et al., 2015) ; en Ecosse (Winterbottom, 2000) ; en Roumanie (Ioana-Toroimac, 2009) ; etc..

Les données issues de ce travail de thèse révèlent que cette tendance au tressage à la fin du PAG, n'est pas généralisable à la Garonne toulousaine, qui se caractérise par la présence de bancs alluviaux et un chenal mobile sur les cartes antérieures à 1900, mais pour laquelle un indice de tressage faible a été estimé. Outre les discontinuités observées le long de la Garonne toulousaine au cours de cette période, la tendance dominante du linéaire à la fin du XIX^e siècle reste le méandrage. Un modèle similaire a été observé sur le Tage et le Jarama en Espagne (Uribe Larrea et al., 2003). Toutefois, ces cours d'eau présentent des débits nettement inférieurs à celui de la Garonne toulousaine. Une étude comparative des

conditions environnementales de différents cours d'eau pour lesquels le style fluvial de la fin du XIX^e siècle a été appréhendé, pourrait permettre une discussion de la/les variable(s) de contrôle à l'origine de cette différenciation.

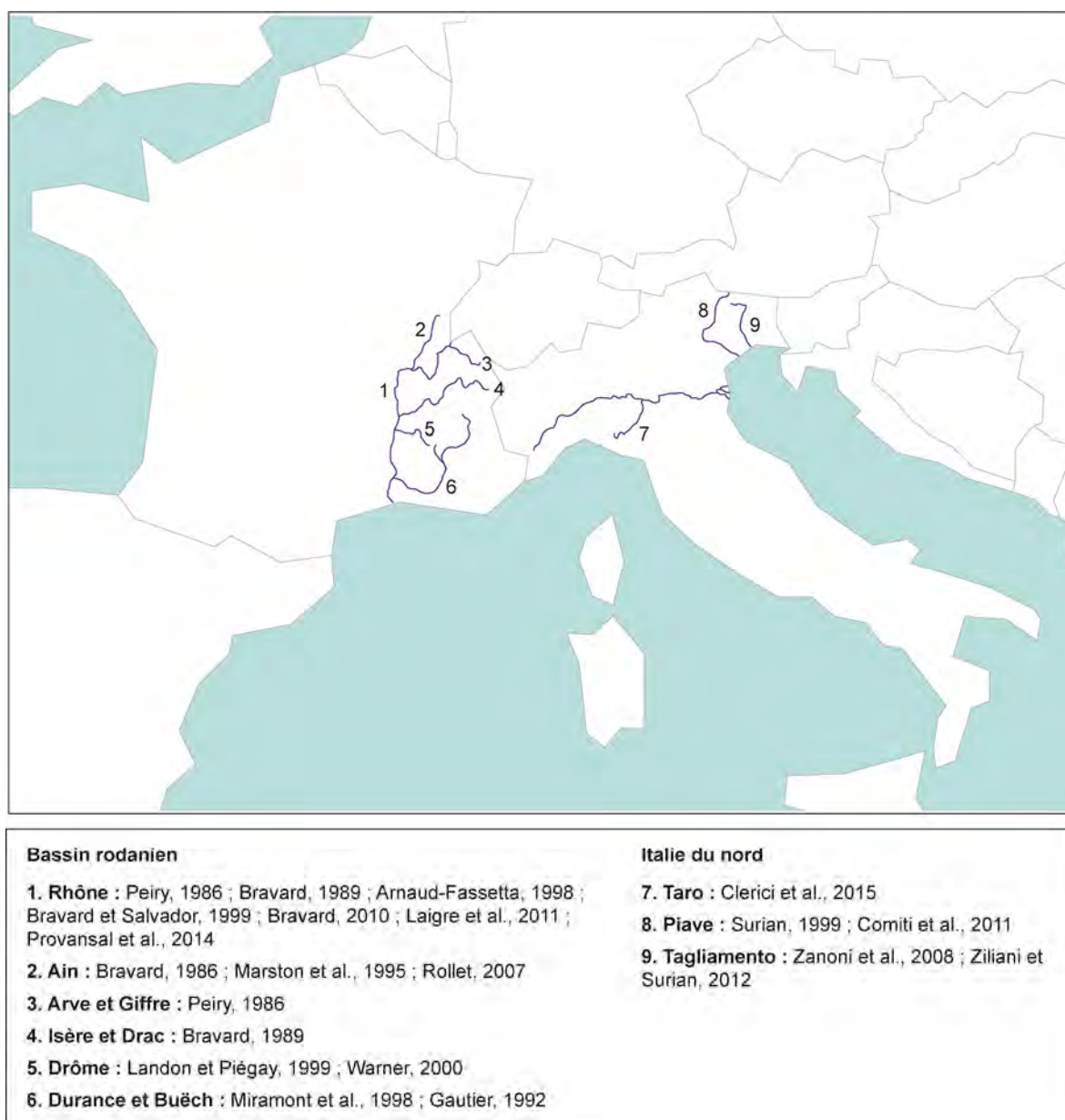


Figure 12.1 : Carte des principaux cours d'eau circum-alpins pour lesquels une tendance au tressage a été identifiée au cours du XIX^e siècle.

12.3. Les *channel changes* du XX^e siècle

Les travaux réalisés sur les *channel changes* des 150 à 200 dernières années en Europe révèlent généralement une réduction de la dynamique fluviale à la fin du XIX^e siècle / au début du XX^e siècle (Fig. 12.2). Ce changement se traduit principalement par la contraction des bandes actives et l'incision des chenaux, conduisant à la disparition du style en tresse au profit du méandrage ou de styles plus marginaux tels que le vagabondage ou l'anastomose. Un changement radical a ainsi été observé dès la seconde moitié du XIX^e

siècle sur les grands fleuves ayant fait l'objet d'endiguements, tel que le Rhin, stabilisé entre Bâle et Strasbourg de 1842 à 1876 par les travaux de correction de l'ingénieur Tulla (Tricart et Bravard, 1991 ; Arnaud, 2012) ou le Rhône, sur lequel le modèle d'aménagement rhénan a été reproduit à partir des années 1860, suivi du système Girardon à partir des années 1880 (Bravard et Clemens, 2008). Des changements tout aussi précoces ont été observés sur la Loire, qui se caractérise par une contraction de la bande active et une végétalisation des bancs (anastomose) depuis la seconde moitié du XIX^e siècle, attribuée au retrait de la navigation et à l'impact à long terme d'ouvrages tels que les levées, progressivement mises en place au cours des 500 dernières années (Burnouf et Carcaud, 2000 ; Garcin et al., 2006 ; Grivel, 2008 ; Grivel et Gautier, 2012).

Une intensification globale du phénomène d'incision et de contraction des chenaux a été observée plus tardivement sur la plupart des cours d'eau européens, à partir des années 1950 (e.g., Liébault et Piégay, 2002 ; Zawiejska et Wyzga, 2010 ; Zilina et Surian, 2012 ; Segura-Beltran et Sanchis-Ibor, 2013 ; Bollati et al., 2014 ; Scorpio et al., 2015 - Fig. 12.2). Ce phénomène a été associé à la *grande accélération* à proprement parler (Steffen et al., 2015), i.e., à la forte augmentation des pratiques anthropiques (endiguements, barrages, extractions en lit mineur).

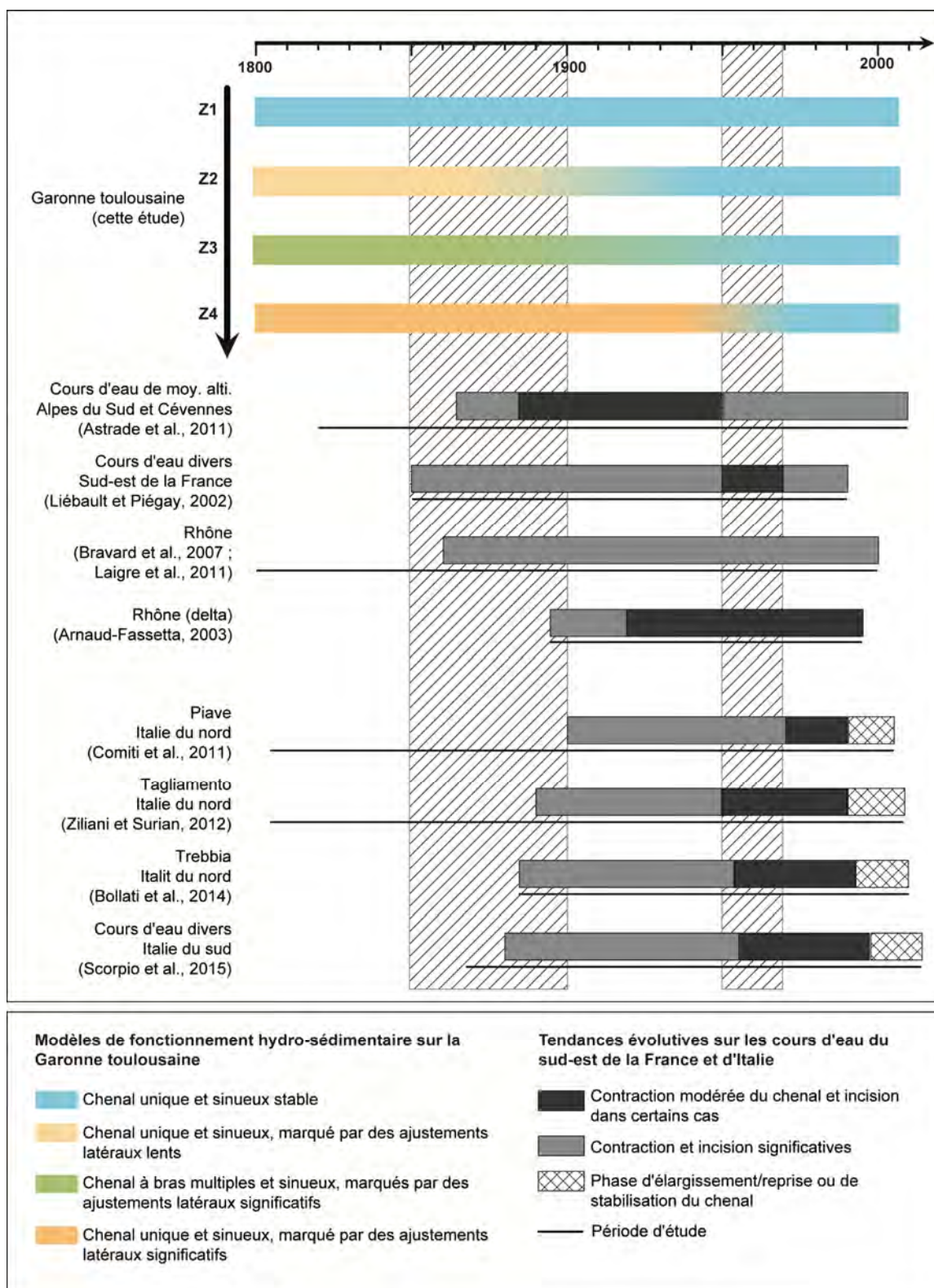
Les évolutions observées sur la Garonne toulousaine s'inscrivent dans ces tendances globales (Fig. 12.2), avec : 1) une amorce du phénomène de simplification/stabilisation du chenal à la fin du XIX^e siècle / au début du XX^e siècle dans les zones amont et médiane, qui concorde avec la première phase d'ajustement identifiée à l'échelle européenne et 2) l'apparition du phénomène dans la zone aval au cours de la seconde moitié du XX^e siècle, qui concorde avec la seconde phase d'ajustement/intensification observée à l'échelle européenne.

12.4. L'ère de la reprise?

Les études centrées sur les cours d'eau du nord de l'Italie, ont identifié une phase de reprise hydro-morphologique, amorcée depuis les années 1990 (Fig. 12.2). Cette phase se caractérise par une inversion des tendances évolutives en termes de largeur et de profondeur du chenal (élargissement et aggradation ou stabilisation). Les flux sédimentaires étant généralement contraints par les barrages construits dans les zones amont des bassins versants, cette phase de reprise a principalement été attribuée à une amélioration du bilan sédimentaire par érosion latérale, notamment suite à l'arrêt des extractions de sédiment en lit mineur (Surian et Rinaldi, 2004 ; Comiti et al., 2011 ; Ziliani et Surian, 2012). Cette phase a aussi été observée dans le sud de l'Italie (Scorpio et al., 2015) mais elle apparaît moins marquée que dans le nord en raison de la présence de structures de protection des berges.

Sur d'autres cours d'eau européens, pour lesquels les grands aménagements des XIX^e et XX^e siècles empêchent l'auto ajustement du chenal, même après arrêt des activités extractrices, des démarches de restauration conciliant rétablissement de la dynamique hydro-sédimentaire et préservation des enjeux socio-économiques (navigation, production hydro-électrique, urbanisation, etc.) sont aujourd'hui mises oeuvre (brève revue dans Campana et al., 2014). E.g., les reconnexion de chenaux et/ou ré-inondations de compartiments de la plaine alluviale sur le Rhin (Simons et al., 2001 ; Schmitt et al., 2012) ; la reconnexion de chenaux sur le Danube (Tockner et al., 1998) ou sur le Rhône (Castella et al., 2012) ; le rétablissement de l'érosion latérale dans les Alpes (Habersack et Piégay, 2008).

La résolution des données utilisées dans cette étude ne permet pas d'appréhender l'évolution du lit de la Garonne toulousaine au cours de la dernière décennie. Toutefois, nous pouvons envisager qu'aucune évolution de ce type n'est amorcée, étant donné qu'une partie du lit est aujourd'hui stabilisée par des structures de protection des berges et qu'aucun plan global de restauration n'a pour l'instant été établi.



12.5. Conclusion du chapitre 12

Les tendances observées sur les chenaux garonnais datés du Moyen Âge central concordent avec la stabilité géomorphologique identifiée dans d'autres secteurs d'Europe pour la même période.

Par ailleurs, les phases d'ajustement de la Garonne toulousaine mises en évidence par cette étude concordent aussi avec les tendances observées à l'échelle européenne, principalement sur les cours d'eau du sud-est de la France et du nord de l'Italie, *i.e.*, : 1) une phase de forte activité hydro-sédimentaire jusqu'à la fin du XIX^e siècle ; 2) une phase de réduction de la dynamique fluviale à partir du début du XX^e siècle et 3) une phase d'intensification des phénomènes d'incision et de contraction du chenal dans les années 1950.

Toutefois, plusieurs points de discordance peuvent être soulignés : 1) la période correspondant à la phase finale du PAG, généralement caractérisée par une tendance au tressage, se caractérise par un maintien de la dynamique de méandrage sur la Garonne toulousaine ; 2) la phase d'ajustement amorcée au début du XX^e siècle n'est observée que dans les zones amont et médiane du linéaire et 3) la phase d'accentuation des phénomènes d'incision et de contraction, correspond ensuite à l'ajustement de la zone aval.

Sur certains cours d'eau européens, une phase de reprise de la dynamique hydro-sédimentaire ou d'amélioration des conditions du milieu a été observée. Dans le premier cas, cette amorce de changement fait suite à l'arrêt des activités extractrices, dans le second cas, elle dépend de démarches de restauration entreprises sur des cours d'eau fortement anthropisés. Sur la Garonne, ce type d'évolution n'est pas observé à ce jour.

Conclusion de la Partie 4

Le croisement des données issues de l'analyse des cartes historiques et des travaux de terrain permet de proposer une reconstitution de la trajectoire d'évolution de la Garonne toulousaine au cours du dernier millénaire.

Au cours de la période correspondant dans la littérature à l'Optimum Climatique Médiéval (OM, 900-1300), la Garonne toulousaine semble s'être caractérisée par un hydrodynamisme relativement réduit, marqué par un chenal unique, un paléodébit à plein bord très inférieur à l'actuel et une charge sableuse abondante. Ce fonctionnement, envisagé sur observation de trois paléochenaux datés de la période comprise entre les X^e et XIII^e siècles, concorde avec : 1) la faiblesse des archives historiques faisant référence à des événements de crue au cours de cette période, 2) la chronique des températures qui révèle une période chaude et 3) les tendances à la stabilité, voire à l'incision des chenaux reconnus en Europe.

La période correspondant au Petit Âge Glaciaire (PAG, 1400-1900) n'est quasiment pas renseignée par nos données de terrain. Seul le XIX^e siècle, qui correspond à la phase terminale du PAG est renseignée par les sources cartographiques, ainsi que par les données de terrain. Il est possible de voir dans cette absence de donnée l'empreinte d'un hydrodynamisme fort, ayant provoqué la remobilisation régulière des archives sédimentaires. Toutefois la validation de cette hypothèse nécessiterait de nouveaux sondages. A la fin du XIX^e siècle, les données issues des cartes historiques et des travaux de terrain concordent vers un style fragmenté : 1) les cartes historiques révèlent quatre segments marqués par des modes de fonctionnement différents et 2) les données de terrain révèlent une disparité spatiale entre les niveaux de remplissage des chenaux situés dans la partie médiane du linéaire et ceux situés dans la zone aval. La tendance dominante est toutefois au méandrage, ce qui s'avère atypique par rapport à la tendance au tressage observée sur la plupart des cours d'eau européens.

Au cours du XX^e siècle, qui correspond au début du réchauffement global mais aussi à l'intensification des activités sur le fleuve et dans le bassin, les données cartographiques ont révélé une simplification précoce du linéaire (dès la période 1868-1940) dans les zones amont et médiane, qui peut être mise en relation avec plusieurs facteurs de contrôle : 1) le recul de l'activité meunière à la fin des années 1910, propre au secteur amont (Toulouse) ; 2) la réduction de l'hydraulicité à la fin du XIX^e siècle, liée à la transition PAG/RG ; 3) les derniers aménagements ponctuels mis en place à la fin du XIX^e siècle pour faciliter la navigation et/ou gagner des terres sur le fleuve dans les secteurs les plus dynamiques et 4) les extractions artisanales en lit mineur, pratiquées dès le début du XIX^e siècle. Au cours de la seconde moitié du XX^e siècle, la réduction de la dynamique fluviale observée dans la zone aval a été mise en relation avec l'industrialisation des extractions et la campagne de protection des berges. Ces résultats s'accordent avec les deux phases observées à l'échelle européenne : 1) contraction et incision des chenaux lente jusqu'à la moitié du XX^e siècle sous l'effet des premiers aménagements hydrauliques de grande ampleur, de la reforestation des versants et de la transition climatique PAG/RG et 2) intensification des phénomènes sous l'effet de la grande accélération.

A l'heure actuelle, une tendance à la reprise de la dynamique fluviale est observée sur les cours d'eau d'Europe les moins anthropisés et des démarches de restauration sont mises en œuvre sur les chenaux à fort enjeu hydroélectrique ou marchand. La Garonne reste parmi les cours d'eau en marge de cette tendance.

Conclusion générale

La dynamique fluviale des cours d'eau est aujourd'hui une thématique de recherche majeure. Les travaux portant sur ce sujet ont mis en évidence des évolutions plus ou moins communes et synchrones à l'échelle européenne : 1) une incision et une contraction généralisées des chenaux depuis la fin du XIX^e siècle / le début du XX^e siècle et 2) une intensification de ce phénomène au cours de la seconde moitié du XX^e siècle. Ces évolutions ont principalement été attribuées à des facteurs de contrôle imputables à l'augmentation des activités anthropiques dans le bassin versant, dans la plaine ou sur/dans le chenal. Certaines ont un effet direct sur les lits fluviaux (endiguements, barrages, extractions de granulats en lit mineur, etc.), d'autres ont un effet plus indirect (altération du régime hydroclimatique, modification de la fourniture alluviale par le changement d'occupation du sol, etc.). Il s'agit donc bien là d'une évolution sans précédent, qui constitue une signature de l'Anthropocène.

Sur la Garonne, ce même phénomène de chenalisation a été observé et décrit depuis les années 1960 dans la portion dite toulousaine (90 km entre les confluences de l'Ariège et du Tarn - Beaudelin, 1989 ; Steiger et al., 1998 ; Steiger et al., 2000). Ce phénomène a été associé à plusieurs facteurs de contrôle de nature anthropique : extractions industrielles de granulats en lit mineur entre les années 1960 et les années 1980 ; campagne de protection des berges dans le département du Tarn-et-Garonne entre 1960 et 1984 ; construction de barrages dans le bassin versant tout au long du XX^e siècle et augmentation des prélèvements d'eau pour l'irrigation à partir des années 1950.

Par contre, peu de travaux avaient jusqu'à aujourd'hui abordé l'évolution de la dynamique fluviale de la Garonne à plus long terme. De plus, les quelques travaux menés sur des périodes séculaires à pluriséculaires se sont concentrés sur des échelles localisées (Decamps et al., 1989 ; Valette et Gazelle, 2000 ; Valette et Carozza, 2010), et/ou ont travaillé de manière qualitative à semi-quantitative dans une optique d'analyse paysagère ou écologique et non pour un diagnostic géomorphologique (Valette et Gazelle, 2000 ; Muller et al., 2002 ; Valette, 2002 ; Valette et al., 2014).

En proposant *une reconstitution de la trajectoire d'évolution de la Garonne toulousaine sur une échelle de temps pluriséculaire*, ce travail vient ainsi compléter les connaissances antérieures (questionnements autour de la morphologie du chenal, des processus géomorphologiques et des variables hydro-sédimentaires), les affiner (spatialisation et périodisation des changements) et les étendre chronologiquement (couverture du dernier millénaire).

Apports thématiques et méthodologiques

Cette thèse apporte de nouvelles connaissances sur l'évolution de la dynamique fluviale du principal cours d'eau pyrénéen. Elle permet ainsi de positionner le quart sud-ouest de la France au sein d'un corpus bibliographique déjà très dense sur la question des *channel changes* du XX^e siècle en Europe. Il ressort de cette confrontation une bonne concordance temporelle entre les tendances observées sur la Garonne moyenne et la chronologie établie à l'échelle européenne (deux phases d'ajustement d'intensités variées).

Simultanément, ce travail fournit de nouvelles données sur la réponse des cours d'eau aux perturbations climatiques du dernier millénaire. Les résultats montrent d'abord un ajustement du chenal à des conditions d'écoulement réduit et à une charge solide plus riche en sable au cours de la phase climatique clémente de l'Optimum Médiéval (OM, 900-1300), qui est encore aujourd'hui peu renseignée par les données géomorphologiques. Ils révèlent par ailleurs une absence de tressage sur la Garonne toulousaine au cours de la seconde

moitié du XX^e siècle, qui correspond à la phase terminale du Petit Âge Glaciaire (PAG, 1400-1900). Le PAG ayant souvent été considéré comme synchrone d'une métamorphose fluviale et d'une évolution vers le tressage, cette donnée introduit la possibilité d'un modèle de fonctionnement hydro-sédimentaire au plus fort du PAG, qui se distingue du référentiel établi dans le domaine circum-alpin.

Enfin, ce travail propose un double essai méthodologique avec : 1) une analyse à la fois multivariée et diachronique des formes fluviales de la Garonne à partir de documents cartographiques historiques (recours à l'AFM pour traiter une base de données géomorphométrique générée à une résolution de 1 km le long du linéaire) et 2) le croisement de ces résultats avec des données de terrain multiples (topographiques, géophysiques et sédimentaires) issues du sondage de 11 sites d'étude supposés correspondre à des paléochenaux de la Garonne. De cette manière, ce travail vient contribuer d'un point de vue méthodologique à la recherche sur les trajectoires d'évolution, en proposant une méthode d'analyse adaptée à la complexité tant spatiale que temporelle sous-tendue dans cette notion. Cette démarche contribue ainsi à donner une dimension appliquée à la notion de trajectoire d'évolution, qui est encore aujourd'hui fortement inscrite dans un cadre théorique.

Synthèse des principaux résultats

Deux phases d'ajustement au cours du XX^e siècle

En accord avec les travaux antérieurs sur la dynamique fluviale de la Garonne toulousaine (Beaudelin, 1989 ; Steiger et al., 1998 ; Steiger et al., 2000), une stabilisation du chenal est observée à partir de l'intervalle 1940-1970 dans la zone aval du linéaire (30 km entre Verdun-sur-Garonne et St-Nicolas-de-la-Grave). Ce phénomène dépend très clairement de la campagne de protection des berges mise en œuvre dans le département du Tarn-et-Garonne entre 1960 et 1984.

Cependant, un phénomène de contraction et de stabilisation partielle des chenaux plus précoce, qui était jusqu'à ce jour inconnu, apparaît dès la fin du XIX^e siècle / le début du XX^e siècle dans la zone amont/médiane du linéaire (33 km en aval de Toulouse). Cette nouvelle donnée révèle l'implication de facteurs de contrôle antérieurs à la crise anthropique du XX^e siècle, caractérisés par une efficacité accrue dans la zone amont/médiane du linéaire :

- 1) le recul de l'activité meunière à la fin des années 1910 propre au secteur de Toulouse, qui a conduit au rattachement à la berge des îles individualisées par des canaux de fuite ;
- 2) la réduction de l'hydraulicité à la fin du XIX^e siècle (transition PAG/RG) visible sur la chronique des hauteurs d'eau (HYDRO ; Serret, 1874 ; Pardé, 1928 ; Laffont, 1997), susceptible d'expliquer un phénomène plus global de rattachement des îles à la berge dans le secteur de Grenade et la stabilisation de certaines formations alluviales plus en amont ;
- 3) les derniers aménagements ponctuels mis en place à la fin du XIX^e siècle dans les secteurs les plus dynamiques pour faciliter la navigation et/ou gagner des terres sur le fleuve, dont l'efficacité a probablement été accrue par la réduction du régime de crue ;
- 4) les extractions artisanales en lit mineur, susceptibles d'avoir provoqué un phénomène d'incision localisé dès le début du XX^e siècle.

Un linéaire fragmenté au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle

Il apparaît qu'à la fin du XIX^e siècle et probablement depuis au moins la moitié du XVIII^e siècle, la Garonne toulousaine se caractérisait par une tendance globale au méandrage, au

sein de laquelle un fonctionnement hydro-sédimentaire contrasté a été détecté à partir de l'analyse géomorphométrique des cartes historiques. On distingue ainsi :

- *Un chenal unique et sinueux stable* dans les communes de Toulouse et Blagnac (7 km) ;
- *Un chenal unique et sinueux, marqué par des ajustements latéraux lents* entre Blagnac et Gagnac (7 km) ;
- *Un chenal à bras multiples et sinueux, marqués par des ajustements latéraux significatifs* entre Gagnac et Verdun-sur-Garonne (19 km) ;
- *Un chenal unique et sinueux, marqué par des ajustements latéraux significatifs* entre Verdun-sur-Garonne et St-Nicolas-de-la-Grave (30 km).

Ces différents modèles semblent dépendre de discontinuités dans les conditions du milieu (élargissement amont/aval de la basse plaine et fourniture sédimentaire accrue au niveau des principales confluences - Hers et Save). Ils sont appuyés par les données de terrain, qui révèlent une nette différence dans le mode de comblement des chenaux entre les sites situés dans la partie médiane du linéaire et ceux situés dans la partie aval. Ainsi, émerge de ce travail l'image d'une évolution fragmentée du linéaire fluvial garonnais, dépendante de facteurs locaux.

De nouvelles données sur la Garonne à l'Optimum Médiéval (OM), en contraste avec la faiblesse documentaire concernant le Petit Âge Glaciaire (PAG)

Cette étude révèle une faiblesse documentaire concernant la période antérieure au XIX^e siècle (XIV^e-XVIII^e), qui correspond au PAG. En effet, aucune donnée de terrain collectée dans le cadre de ce travail de thèse ne renseigne cette période. Cette carence pourrait être la conséquence d'un hydrodynamisme fort, qui aurait pu générer la remobilisation régulière des archives alluviales.

Par ailleurs, trois chenaux pour lesquels les premiers niveaux de colmatage ont été attribués au Moyen-Âge central ont été caractérisés. Ce type de forme semble être préférentiellement conservé en marge de la bassure (basse plaine inondée régulièrement). Les résultats de l'analyse de leur géométrie 3D tendent vers des systèmes à chenaux uniques, marqués par une capacité hydraulique très inférieure à l'actuel. Dans ce cadre, la morphologie de la Garonne au cours de l'OM, est susceptible de représenter un bon analogue pour étudier la réponse de la Garonne à la baisse attendue des débits dans un contexte de pénurie sédimentaire.

Quelques indices supplémentaires concernant le phénomène d'incision

Enfin, à deux exceptions près, susceptibles de dépendre d'un biais méthodologique et/ou de phénomènes géomorphologiques localisés, tous les paléochenaux sondés sont perchés au dessus du lit actuel, à une hauteur relative comprise entre 1 et 3 m. Cette observation confirme l'existence d'un phénomène d'incision. En l'état, ces données ne nous permettent pas de tirer de plus amples conclusions.

Limites et perspectives

Limites de l'approche croisée

Bien qu'une partie de la démarche d'analyse géomorphométrique des formes fluviales sous SIG ait été automatisée (e.g., création de tronçons de mesure ; calcul d'indices de

surface, périmètre et distance), la démarche dans son ensemble s'avère encore chronophage (géoréférencement de plus de 200 planches ; digitalisation des formes fluviales le long du linéaire à neuf dates ; calage des 63 tronçons de mesure ; mise en œuvre des deux bases de données ; etc.). De plus, l'analyse des résultats issus de l'AFM/CAH est ensuite complexe, et demande un certain niveau d'expertise. Par ailleurs, les résultats sont très dépendants à la fois de la qualité des sources historiques mobilisées, de la résolution temporelle des archives disponibles et de notre interprétation des attributs cartographiés. Cette démarche d'analyse doit donc être perfectionnée afin de fournir un outil efficace et transposable pour la reconstitution des trajectoires d'évolution de cours d'eau à partir de documents cartographiques historiques.

Les résultats de l'approche de terrain reposent eux principalement sur une stratégie de sélection des sites partiellement subjective et sur une délimitation de la section mouillée à plein bord à priori, qui selon les cas, n'est pas toujours clairement visible sur les TRE et le MNT. L'analyse des niveaux de remplissage est aussi une démarche associée à une forte incertitude, étant donné que la délimitation des niveaux/faciès est arbitraire et qu'elle repose sur un échantillon d'environ 10 cm de diamètre et non sur une coupe transversale. De plus, aucun référentiel de processus et environnements de dépôt propre à la Garonne toulousaine n'est pour l'instant disponible, ce qui limite l'interprétation des niveaux observés. Là encore, un développement méthodologique pourrait permettre de rendre la démarche à la fois plus efficace et plus précise.

Enfin, la complémentarité attendue des deux approches, à la fois en terme chronologique et spatial, s'est révélée partiellement décevante en raison d'échelles d'analyses finalement trop hétérogènes pour permettre un réel croisement des données. L'approche cartographique souligne en effet des faits globaux (réduction de la dynamique fluviale à l'échelle du linéaire ; tendances différenciées au sein du linéaire) et passe outre les particularités localisées, qui rendraient l'analyse trop lourde si elles étaient prises en compte. Au contraire, l'approche par site est centrée sur des particularités très locales qui ne peuvent/doivent pas être généralisées. De plus, ces données ne permettent pas d'avoir une approche dynamique. Ces différents points de critique expriment la difficulté d'appréhender la complexité entendue dans la notion de trajectoire d'évolution et soulignent la nécessité de poursuivre la recherche méthodologique sur ce sujet.

Perspectives de recherche et d'application

Au terme de ce travail nous souhaiterions proposer les résultats obtenus aux acteurs de la gestion/restauration de la Garonne, qui pourraient y voir un support pour la restauration hydromorphologique. *E.g.*, : 1) il apparaît que la Garonne toulousaine se caractérise par un gradient amont/aval de sensibilité à l'ajustement, susceptible d'impliquer une meilleure restaurabilité de la zone située à l'aval de Verdun-sur-Garonne ; 2) la zone médiane comprise entre Gagnac et Verdun-sur-Garonne, qui a aussi connu des ajustements significatifs à la fin du XIX^e siècle / au début du XX^e siècle, semble sous contrôle des apports sédimentaires des affluents Hers et Save, susceptibles de générer des formes atypiques (systèmes à chenaux multiples) ; 3) dans ce secteur médian, la réduction de la dynamique fluviale a été précoce (début XX^e siècle) et est probablement dépendante de la réduction de l'hydraulicité liée à la transition entre PAG et RG, ce qui pose la question de la réversibilité des processus observés.

Par ailleurs, la collecte de nouvelles données historiques (cartographiques et textuelles) et la collaboration entre géographes et historiens pourraient permettre : 1) de valider / d'affiner le découpage du linéaire et la chronologie des changements proposés dans cette thèse ; 2) de mettre en évidence des tendances plus localisées ; 3) d'apporter de nouveaux éléments de discussion concernant les facteurs de contrôle des changements observés et 4)

d'inscrire les résultats de cette étude dans un cadre spatial plus large, intégrant la Garonne montagnarde et les affluents directs de la Garonne toulousaine (Hers, Save et Gimone).

En parallèle, la collecte de nouvelles données de terrain pourrait permettre : 1) une meilleure caractérisation des chenaux du Moyen-Âge central, apparemment conservés préférentiellement sur les marges de la bassure ; 2) l'obtention de données concernant la période comprise entre le Moyen-Âge central et le XIX^e siècle, correspondant au PAG (1400-1900) et 3) une meilleure caractérisation des chenaux du XIX^e siècle, notamment des portions à chenal unique. Un tel travail nécessiterait une réflexion concernant la stratégie de sélection des sites d'étude, ainsi qu'une amélioration de la démarche d'analyse afin de gagner en précision et en degré de confiance (cf. Table 13.1).

| Objectif | Stratégie |
|---|---|
| Multiplication des données concernant le Moyen-Âge central | <ul style="list-style-type: none"> Sélection de paléochenaux sur reconnaissance d'une morphologie en plan comparable aux chenaux médiévaux sondés lors de la première campagne (GRE, JUL et MAG) Sondages continus le long de transects perpendiculaires à la basse plaine, choisis de manière aléatoire |
| Collecte de données concernant la période comprise entre le Moyen-Âge central et le XIX ^e siècle | <ul style="list-style-type: none"> Sondages continus le long de transects perpendiculaires à la basse plaine, choisis de manière aléatoire |
| Multiplication et amélioration de la représentativité des données concernant le XIX ^e siècle | <ul style="list-style-type: none"> Sélection de paléochenaux sur reconnaissance de portions à chenal unique sur les cartes du XIX^e siècle |
| Amélioration des mesures pour l'estimation des paléodébits à plein bord | <ul style="list-style-type: none"> Sélection/délimitation des sites de sondage sur observation du modèle numérique de terrain (MNT) haute résolution afin de couvrir la section transversale du chenal dans son intégralité Multiplication des carottages sédimentaires le long de la forme en plan des paléochenaux afin d'estimer des valeurs de pente Mise à contribution de techniques géophysiques telles que le géoradar, mieux à même de définir la position et la forme du fond des chenaux que les tomographies de résistivité électrique (Hausmann et al., 2013) |
| Optimisation de l'analyse des niveaux de remplissage | <ul style="list-style-type: none"> Réalisation d'un référentiel de processus et environnement de dépôt propre à la Garonne toulousaine Scan XRF des carottes Datations ²¹⁰Pb et ¹³⁷Cs |

Table 13.1 : Proposition de stratégie à adopter pour la réalisation d'une future campagne.

Enfin, au regard de l'originalité des données concernant la dynamique fluviale de la Garonne toulousaine au XIX^e siècle, nous souhaiterions que la poursuite des travaux de recherche sur ce sujet s'inscrive dans une démarche comparative. En impliquant des cours d'eau tels que l'Ebre (et ses affluents de rive gauche) ou l'Adour, une telle approche pourrait permettre de proposer un modèle pyrénéen à confronter au modèle circum-alpin.

Références bibliographiques

- Adam, P., Debais, N., Malavoi, J.R., 2007. Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau. Agence de l'eau Seine-Normandie, DEMAA - Service eaux de surface. 160 p.
- Alber, A., Piégay, H., 2011. Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale: Application to the Rhône basin (France). *Geomorphology* 125, 343-360.
- Amoros, C., Petts, G.E., 1993. Hydrosystèmes fluviaux. Paris, Masson, 300p.
- Amoros, C., Roux, A.L., Reygrobellet, J.L., Bravard, J.P., Pautou, G., 1987. A method for applied ecological studies of fluvial hydrosystems. *Regul. River.* 1, 1, 17-36.
- Antoine, J.M., 2009. L'histoire du climat par ses extrêmes. Sources géohistoriques et inondations dans les Pyrénées depuis le *Petit Âge Glaciaire*. *Archéologie du Midi Médiéval* 27, 143-155.
- Antoine, J.M., 2011. Vulnérabilité et adaptation des sociétés montagnardes à la torrentialité au cours du *Petit Âge Glaciaire* dans les Pyrénées. *Sud-Ouest Européen* 32, 53-66.
- Arnaud, F., 2012. Approches géomorphologiques historique et expérimentale pour la restauration de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial aménagé : le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach (France, Allemagne). Thèse de doctorat, Université de Lyon 2, France.
- Arnaud, F., Piégay, H., Schmitt, L., Rollet, A.J., Ferrier, V., Béal, D., 2015. Historical geomorphologic analysis (1932-2011) of a by-passed river reach in process-based restoration perspectives: The Old Rhine downstream of the Kembs diversion dam (France, Germany). *Geomorphology* 236, 163-177.
- Arnaud-Fassetta, G., 1998. Dynamiques fluviales holocènes dans le delta du Rhône. Thèse de doctorat, Université de Provence (Aix-Marseille 1), France.
- Arnaud-Fassetta, G., 2003. River channel changes in the Rhone Delta (France) since the end of the Little Ice Age : geomorphological adjustment to hydroclimatic change and natural resource management. *Catena* 51, 141-172.
- Arnaud-Fassetta, G., 2007. L'hydrogéomorphologie fluviale, des hauts bassins montagnards aux plaines côtières : entre géographie des risques, géoarchéologie et géosciences. HDR, Université Paris Diderot (Paris 7), France.
- Arnaud-Fassetta, G., Masson, E., Reynard, E. (Eds), 2013. European continental hydrosystems under changing water policy. Friedrich Pfeil Verlag, München, 344 p.
- Arrouy, J.M., 2005. L'île de tounis. Loubatières, France, Portet-sur-Garonne.
- Ashmore, P.E., 1982. Laboratory modelling of gravel braided stream morphology. *Earth Surf. Proc. Land.* 7, 3, 201-225.
- Ashmore, P., 1991. How Do Gravel-Bed Rivers Braid? *Can. J. Earth Sci.* 28, 3, 326-341.
- Astrade, L., Jacob-Rousseau, N., Bravard, J.-P., Allignol, F., Simac, L., 2011. Detailed chronology of mid-altitude fluvial system response to changing climate and societies at the end of the Little Ice Age (Southwestern Alps and Cévennes, France). *Geomorphology* 133, 100-116.
- Baker, V.R., Webb, R.H., House, P.K., 2002. The scientific and societal value of paleoflood hydrology. In: House, P.K., Webb, R.H., Baker, V.R., Levish, D.R. (Eds.). *Ancient Floods, Modern Hazards*, Washington, DC, AGU Press, pp. 1-19.

Barnaud, G., Fustec, E., 2007. Conserver les zones humides : pourquoi? comment? Educagri éditions/Quae éditions, Dijon, Versailles, France, 296 p.

Beaudelin, P., 1989. Conséquences de l'exploitation des granulats dans la Garonne. *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest* 60 4, 603-616.

Beechie, T.J., Liermann, M., Pollock, M.M., Baker, S., Davies, J., 2006. Channel pattern and river-floodplain dynamics in forested mountain river systems. *Geomorphology* 78, 124-141.

Bensizerara, D., Chenchouni, H., Si Bachir, A., Houhamdi, M., 2013. Ecological status interactions for assessing bird diversity in relation to a heterogeneous landscape structure. *Avian biology research* 6, 1, 67-77.

Binley, A., 2015. Tools and Techniques: Electrical Methods. In: Schubert G. (Ed.), *Treatise on Geophysics* (Second Edition). Elsevier, Oxford, pp. 233-259.

Bledsoe, B.P., Watson, C.C., 2001. Effects of urbanization on channel instability. *J. Am. Water Resour. As.* 37, 255-270.

Blott, S.J., Pye, K., 2001. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Proc. Land.* 26, 1237-1248.

Bollati, I.M., Pellegrini, L., Rinaldi, M., Duci, G., Pelfini, M., 2014. Reach-scale morphological adjustments and stages of channel evolution: The case of the Trebbia River (northern Italy). *Geomorphology* 221, 176-186.

Booth, D.B., 1991. Urbanization and the Natural Drainage System - Impacts, Solutions, and Prognoses. *Northwest Environ. J.* 7, 93-118.

Boulton, A.J., Findlay, S., Marmonier, P., Stanley, E.H., Valett, H.M., 1998. The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 29, 59-81.

Brandt, S.A., 2000. Classification of geomorphological effects of dams. *Catena* 40, 375-401.

Bravard, J.P., 1983. Les sédiments fins des plaines d'inondation dans la vallée du Haut-Rhône. *Revue de géographie alpine* 71, 4, 363-379.

Bravard, J.P., 1986. La basse vallée de l'Ain : dynamique fluviale appliquée à l'écologie. In: Roux, A.L. (Ed.), *Recherches interdisciplinaires sur les Ecosystèmes de la basse plaine de l'Ain* (France), potentialités évolutions et gestion. Doc. Cartogr. Ecol. XXIX. Université Grenoble I, 166 p.

Bravard, J.P., 1989. La métamorphose des rivières des Alpes françaises à la fin du Moyen-Âge et à l'Epoque Moderne. *Bulletin de la Société Géographique de Liège* 25, 145-157.

Bravard, J.P., 1994. L'incision des lits fluviaux : du phénomène morphodynamique naturel et réversible aux impacts irréversibles. *Rev. Géogr. Lyon* 69, 1, 5-10.

Bravard, J.-P., 2001. Un enjeu hydropolitique et environnemental majeur pour la Chine : le transfert Sud-Nord. *Hérodote*, 102, 57-71.

Bravard, J.P., 2010. Discontinuities in braided patterns: The River Rhône from Geneva to the Camargue delta before river training. *Geomorphology* 117, 219-233.

Bravard, J.P., Salvador, P.G., 1999. Géomorphologie et sédimentologie des plaines alluviales. In: Ferdières A. (Ed.), *La Géologie. Les sciences de la terre. Collection Archéologiques*, Paris, pp. 57-92.

Bravard, J.P., Magny, M., (dir.) 2002. Les fleuves ont une histoire. Paléo-environnement des rivières et des lacs français depuis 150000 ans. Editions Errance, Paris, 312 p.

Bravard, J.P., Clemens, A., 2008. Le Rhône en 100 questions. ZABR, GRAIE, Villeurbanne, 295 p.

- Bravard, J.P., Amoros, C., Pautou, G., Bornette, G., Bournaud, M., Creuzé des Châtelliers, M., Gibert, J., Peiry, J.L., Perrin, J.F., Tachet, H., 1997. River incision in south-east France: Morphological phenomena and ecological effects. *Regul. River.* 13, 75-90.
- Bravard, J.P., Kondolf, G.M., Piégay, H., 1999. Environmental and societal effects of channel incision and remedial strategies. In: Darby, S.E., Simon, A. (Eds.), *Incised River Channels: Processes, Forms, Engineering and Management*. Wiley, Chichester, pp. 303-341.
- Bravard, J.P., Provansal, M., Arnaud-Fassetta, G., Chabbert, S., Gaydou, P., Dufour, S., Richard, F., Valleteau, S., Melun, G., Passy, P., 2008. Un atlas du paléo-environnement de la plaine alluviale du Rhône de la frontière suisse à la mer. *Collection EDYTEM, Cahiers de Géographie*, 6, 16 p.
- Brezinski, C., 2010. *Les images de la Terre. Cosmographie, géodésie, topographie et cartographie à travers les siècles*. L'Harmattan, Paris, 298 p.
- Brice, J.C., 1974. Evolution of meander loops. *Bull. Geol. Soc. Am.* 85, 581-586.
- Brice, J.C., 1982. Stream channel stability assessment. US Department of Transportation, Federal Highway Administration Report FHWA/RD-82/021, Washington DC, 42 p.
- Brice, J.C., 1984. Planform properties of meandering rivers, in *River Meandering*. American Society of Civil Engineers, New York, 1-15.
- Brierley, G.J., Fryirs, K.A., 2005. *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*. Blackwell, Oxford, UK, 398 p.
- Brierley, G.J., Fryirs, K., Cullum, C., Tadaki, M., Qing Huang, H., Blue, B., 2013. Integrating the theory and practice of geomorphology to develop place-based understandings of river systems. *Progress in Physical Geography*, 1-21.
- Brookes, A., 1987. Restoring the sinuosity of artificially straightened stream channels. *Environ. Geol. Water S.* 10, 33-41.
- Brookes, A., 1988. *Channelized Rivers: Perspectives for Environmental Management*. J. Wiley and Sons, Chichester, U.K..
- Brookes, A., 1990. Restoration and Enhancement of Engineered River Channels: Some European Experiences. *Regul. River.* 5, 1, 45-56.
- Brookes, A., 1992. Recovery and restoration of some engineered British river channels. In: Boon, P.J., Calow, P., Petts, G.E. (Eds.), *River Conservation and Management*. John Wiley, Chichester, 337-352.
- Brunsdon, D., Thornes, J.B., 1979. Landscape sensitivity and change. *Transactions of the Institute of British Geographers NS4*, 463-484.
- Bruxelles, L., Jarry, M., 2011. Climatic conditions, settlements patterns and cultures in the Paleolithic: The example of the Garonne Valley (southwest France). *J. Hum. Evol.* 61, 538-548.
- Bruxelles, L., Pons, F., Magnin, F., Bertrand, A., 2010. Âges et modalité de la mise en place de la couverture limoneuse de la basse plaine de la Garonne d'après l'exemple du site de Fontréal (Castelnau-d'Estrétefonds, Haute-Garonne). *Quaternaire* 21, 339-348.
- Buffington, J.M., Montgomery, D.R., 2013. Geomorphic classification of rivers. In: Shroder, J., Whol, E., (Eds.), *Treatise on Geomorphology*, vol. 9., San Diego, Academic Press, 730-767.
- Burnouf, J., Carcaud, N., 2000. L'homme et les vallées : les vals de Loire de Tours à Angers. *Annales de Bretagne et des pays de l'Ouest*, 107, 1, 7-22.
- Cairns, J., 1991. The status of theoretical and applied science of restoration ecology. *The Environmental Professional* 11, 152-159.

Campana, D., Marchese, E., Theule, J.I., Comiti, F., 2014. Channel degradation and restoration of an Alpine river and related morphological changes. *Geomorphology* 221, 230-241.

Carozza, J.M., Puig, C., Odier, T., Valette, P., Passarrius, O., 2012. Lower Mediterranean plain accelerated evolution during the Little Ice Age: Geoarchaeological insight in the Tech basin (Roussillon, Gulf of Lion, Western Mediterranean). *Quaternary International* 266, 94-104.

Carozza, J.M., Valette, P., Carozza, L., Llubes, M., Ferdinand, L., Edou Obame, S., Sévègnes, L., 2013. L'architecture morpho-sédimentaire de la basse plaine de la Garonne moyenne en aval de Toulouse : premiers résultats. *Quaternaire* 24, 455-464.

Carozza, J.M., Carozza, L., Valette, P., Llubes, M., Py, V., Galop, D., Danu, M., Ferdinand, L., David, M., Sévègnes, L., Bruxelles, L., Jarry, M., Duranthon, F., 2014. The subfossil tree deposits from the Garonne Valley and their implications on Holocene alluvial plain dynamics. *C.R. Geoscience* 346, 20-27.

Castella, E., Beguin, O., Besacier Monbertrand, A.L., Dolédec, S., Forcellini, M., Lamouroux, N., Mayor, H., McCrae, D., M'rigoux, S., Olivier, J.M., Paillex, A., Sagnes, P., Segura, S., Statzner, B., 2012. What have we learnt? - a multi-year monitoring of invertebrates and fish in the Rhone river under restoration. Final Proc. Int. Conf. Integrative Sciences and Sustainable Development of Rivers. Lyon, France, pp. 109-111.

Cavaillé, A., 1965. Les unités morphologiques des basses plaines de la Garonne. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest* 36, 243-278.

Champion, M., 1863. Les inondations en France depuis le VI^{ème} siècle jusqu'à nos jours. Dunod, Paris, 6 vol.

Chappart, G., Reynard, N., 2007. La carte topographique française de 1887 à nos jours. *CFC* 191, 53-67.

Chavent, M., Kuentz-Simonet, V., Saracco, J., 2012. Orthogonal rotation in PCAMIX. *Advances in Data Analysis and Classification* 6, 131-146.

Chin, A., 2006. Urban transformation of River landscape in a global context. *Geomorphology* 79, 460-487.

Chocat, B. (Coord.), 2013. Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques. Pourquoi? Comment? ASTEE, 357 p.

Chorley, R.J., 1962. *Geomorphology and General Systems Theory*. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 500-B, 10 p.

Church, M., 2006. Bed material transport and the morphology of alluvial rivers. *Annu. Rev. Earth Pl. Sc.* 34, 325-354.

Claverie, J.P., 1879, Notes historiques et renseignements divers sur la ville de Grenade et les communes de ce canton depuis la fin du XIII^e siècle jusqu'à nos jours. Toulouse, 86 p.

Clerici, A., Perego, S., Chelli, A., Tellini, C., 2015. Morphological changes of the floodplain reach of the Taro River (Northern Italy) in the last two centuries. *J. Hydrol.* 527, 1106-1122.

Combes, F., 1989. Restauration des terrains en montagne. Du rêve à la réalité. *Rev. For. Fr.* XLI, 2, 91-106.

Comiti, F., Da Canal, M., Surian, N., Mao, L., Picco, L., Lenzi, M.A., 2011. Channel adjustments and vegetation cover dynamics in a large gravel bed river over the last 200 years. *Geomorphology* 125, 147-159.

- Costa, L., Robert, S., 2009. Guide de lecture des cartes anciennes. Paris, Editions Errance, 104 p.
- Crutzen, P.J., 2002. Geology of mankind: the Anthropocene. *Nature* 415, 23.
- Crutzen, P.J., Stoermer, E.F., 2000. The Anthropocene. *Global Change Newsl.* 41, 17-18.
- Datry, T., Dole-Olivier, M.J., Marmonier, P., Claret, C., Perrin, J.F., Lafont, M., Breil, P., 2008. La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau. *Ingénieries - EAT* 54, 3-18.
- David, M., Carozza, J.M., Valette, P., Llubes, M., Py, V., Groparu, T., 2015. The fluvial dynamics of the middle Garonne river documented by combining historical maps, stratigraphy and geophysics approaches on the Grenade-Ondes study site. *Géomorphologie: relief, processus, environnement* 21, 1, 21-44.
- David, M., Labenne, A., Carozza, J.M., Valette, P., 2016. Evolutionary trajectory of channel planforms in the middle Garonne River (Toulouse, SW France) over a 130-year period: Contribution of mixed multiple factor analysis (MFAmix). *Geomorphology* 258, 21-39.
- DDE 82 (Direction Départementale du Tarn et Garonne), 2006. Etude de la dynamique fluviale de la Garonne en amont du plan d'eau de St Nicolas de la Grave. rapport technique, 67 p.
- Dean, W.E., 1974. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods. *J. sediment. petrol.* 44, 1, 242-248.
- Décamps, H., Fortuné, M., Gazelle, F., 1989. Historical Changes of the Garonne River, Southern France. In: Petts G.E. (Ed.), *Historical Change of Large Alluvial Rivers: Western Europe*. J. WileySons, Chichester, U.K., pp. 249-267.
- Deffontaines, P., 1932. Les hommes et leurs travaux dans les pays de la moyenne Garonne (Agenais, Bas-Quercy). Thèse de doctorat, Université de Lille, France.
- De Groot, R.S., Van der Perk, J., Chiesura, A., Marguliew, S., 2000. Ecological functions and socio-economic values of critical natural capital as a measure for ecological integrity and environmental health. In: Crabbe, P., Holland, A., Ryszkowski, L., Westra, L., (Eds.), *Implementing Ecological Integrity: Restoring Regional and Global Environmental and Human Health*. NATO-Science Series, IV. Earth and Environmental Sciences vol. 1 Kluwer Academic Publishers, Dodrecht/Boston/Londre, pp. 191-214.
- De Heer, A., Mosselman, E., 2004. Flow structure and bedload distribution at alluvial diversions. In: Greco, M., Carravetta, A., Della Morte, R. (Eds.), *River Flow 2004*, pp. 801-806.
- Delmouly, L., Moreau, N., Croze, O., Le Barh, R., 2007. Cartographie du substrat de la Garonne (de la retenue de St-Nicolas-de-la-Grave à Toulouse) et influence sur le comportement de saumons atlantiques en remontée. Agence de l'eau Adour Garonne, rapport technique.
- Downs, P.W., Gregory, K.J., 1993. The sensitivity of river channels in the landscape system. In: Thomas, D.S.G., Allison, R.J. (Eds.), *Landscape Sensitivity*. Wiley, Chichester, pp. 15-30.
- Downs, P.W., Dusterhoff, S.R., Sears, W.A., 2013. Reach-scale channel sensitivity to multiple human activities and natural events: lower Santa Clara river, California, USA. *Geomorphology* 189, 121-134.
- Doyle, M.W., Harbor, J.M., Rich, C.F., Spacie, A., 2000. Examining the effects of urbanization on streams using indicators of geomorphic stability. *Physical Geography* 21, 155-181.
- Dufour, S., 2005. Contrôles naturels et anthropiques de la structure et de la dynamique des forêts riveraines des cours d'eau du bassin rhodanien (Ain, Arve, Drôme et Rhône). Thèse de doctorat, Université de Lyon 3, France.

Dufour, S., Piégay, H., 2006. Forêts riveraines des cours d'eau et ripisylves : spécificités, fonctions et gestion. *Rev. For. Fr.* LVIII, 4, 339-350.

Dufour, S., Piégay, H., 2009. From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits. *River. Res. Applic.* 24, 1-14.

Eaton, B.C., Millar, R.G., Davidson, S., 2010. Channel patterns: Braided, anabranching, and single-thread. *Geomorphology* 120, 353-364.

Erskine, W.D., Warner, R.F., 1998. Further assessment of flood- and drought-dominated regimes in south-eastern Australia. *Australian Geographer* 29, 2, 257-261.

Erskine, W.D., McFalden, C., Bishop, P., 1992. Alluvial cutoffs as indicators of former channel conditions. *Earth Surf. Proc. Land.* 17, 23-37.

Escofier, B., Pagès, J., 1994. Multiple factor analysis (AFMULT package). *Comput. Stat. and Data Anal.* 18, 121-140.

Escofier, B., Pagès, J., 1998. *Analyses Factorielles Simples et Multiples*. 3rd. Dunod, Paris, France.

Escourrou, G., 1982. *Le climat de la France*. Paris, P.U.F. (Que Sais-je), 128 p.

Ferdinand, L., 2014. *La Garonne en aval de Toulouse : dynamique d'un fleuve et de sa plaine inondable sur la longue durée*. Thèse de doctorat, Université Toulouse II Jean Jaurès, France.

Ferguson, R.I., 1981. Channel form and channel changes. In: Lewin, J. (Ed.), *British Rivers*. Allen and Unwin, London, pp. 90-211.

Ferguson, R.I., 1987. Hydraulic and sedimentary controls of channel pattern. In: Richards, K.S. (Ed.), *River Channels: Environment and Process*. Blackwell, Oxford, UK, pp. 129-158.

Fischer, J., 1932. Le régime de la Garonne pyrénéenne. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest* 3, 3, 281-354.

Fortuné, M., 1988. *Usages passés et écologie de la Garonne*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse Paul Sabatier, Toulouse, 162 p.

Fryirs, K.A., Brierley, G.J., 2013. *Geomorphic Analysis of River Systems: An Approach to Reading the Landscape*. Wiley-Blackwell, 345 p.

Fryirs, K., Spink, A., Brierley, G., 2009. Post-European settlement response gradients of river sensitivity and recovery across the upper Hunter catchment, Australia. *Earth Surf. Proc. Land.* 34, 897-918.

Fryirs, K., Brierley, G.J., Erskine, W.D., 2012. Use of ergodic reasoning to reconstruct the historical range of variability and evolutionary trajectory of rivers. *Earth Surf. Proc. Land.* 37, 763-773.

Garcin, M., Carcaud, N., Gautier, E., Burnouf, J., Castanet, C., Fouillet, N., 2006. Impacts des héritages sur un hydrosystème : l'exemple des levées en Loire moyenne et océanique. In: Allée P., Lespez, L. (Eds.), *L'érosion entre société, climat et paléoenvironnement*, Presses universitaires Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 482 p.

Garneau, C., 2014. *Modélisation du transfert des éléments traces métalliques dans les eaux de surface*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse Paul Sabatier, 222 p.

Garnier, A., 2013. *La dynamique d'un système fluvial et de ses zones humides en Afrique soudano-sahélienne au cours de l'Holocène. Approches géomorphologique et biogéographique. L'exemple du Yamé au Mali*. Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, France.

- Gautier, E., 1992. Recherches sur la morphologie et la dynamique fluviales dans le bassin du Buèch (Alpes du Sud). Thèse de doctorat, Université de Paris X Nanterre, 1992.
- Gob, F., Jacob, N., Bravard, J.P., Petit, F., 2008. The value of lichenometry and historical archives in assessing the incision of submediterranean rivers from the Little Ice Age in the Ardèche and upper Loire (France). *Geomorphology* 94, 170-183.
- Gore, J.A., Shields, F.D., 1995. Can large rivers be restored? *Bioscience* 45, 3, 142-152.
- Graf, W. L., 1977. The rate law in fluvial geomorphology. *Am. J. Sci.* 277, 178-191.
- Graf, W.L., 2006. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology* 79, 336-360.
- Grant, G.E., 2012. The geomorphic response of gravel-bed rivers to dams: perspectives and prospects. In: Church, M., Biron, P., Roy, A. (Eds.), *Gravel-bed Rivers: Processes, Tools, Environments*, John Wiley & Sons, Chichester, pp. 165-181.
- Grant, G.E., Schmidt, J.C., Lewis, S.M., 2003. A geologic framework for interpreting downstream effects of dams on rivers. In: O'Connor J.E. & Grant, G.E. (Eds.), *Water Science and Application 7*, American Geophysical Union, pp. 209-225.
- Gregory, K.J., 2006. The human role in changing river channels. *Geomorphology* 79, 172-191.
- Gregory, S., 2008. Trajectories of Change and the Challenges of Future Conservation and Restoration of Major Rivers. IS RIVERS 2012. Conférence plénière.
- Grivel, S., 2008. La Loire des îles, du Bec d'Allier à Gien : rythmes d'évolution et enjeux de gestion. Thèse de doctorat, Université de Paris VIII Vincennes-Saint-Denis, 518 p.
- Grivel, S., Gautier, E., 2012. Mise en place des îles fluviales en Loire moyenne, du 19^e siècle à aujourd'hui. *Cybergeographie : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 615, mis en ligne le 24 juillet 2012, consulté le 14 octobre 2014. URL : <http://cybergeographie.revues.org/25451>.
- Grove, J.M., 1988. *The Little Ice Age*. Methuen, London.
- Grove, A.T., 2006. A brief consideration of climate forcing factors in view of the Holocene glacier record. *Global. Planet. Change.* 60, 141-147.
- Guillou, N., Chapalain, G., Lepretre, A., 2000. Interpolation spatiale des distributions granulométriques des sédiments de fond. Description théorique, manuel d'utilisation et applications en Manche orientale et en mer d'Iroise. Rapport scientifique.
- Gurnell, A.M., Peiry, J.L., Petts, G.E., 2003. Using historical data in fluvial geomorphology. In: Kondolf, G.M., Piégay, H. (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*. Wiley, pp. 77-101.
- Habersack, H., Piégay, H., 2008. Restoration in the Alps and their surroundings: past experience and future challenges. In: Habersack, H., Piégay, H., Rinaldi, M. (Eds.), *Gravel-Bed Rivers VI: From Process Understanding to River Restoration*. Academic Press, Amsterdam, pp. 703-737.
- Hack, J.T., 1976. Dynamic equilibrium and landscape evolution. In: Melhorn, W.N., Flemal, R.C. (Eds.), *Theories of landform development: Publications in Geomorphology*. Binghamton, State University of New York, pp. 87-102.
- Hausmann, J., Steinelt, H., Kreck, M., Werban, U., Vienken, T., Dietrich, P., 2013. Two-dimensional geomorphological characterization of a filled abandoned meander using geophysical methods and soil sampling. *Geomorphology* 201, 335-343.

Heiri, O., Lotter, A.F., Lemcke G., 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *J. paleolimnol.* 25, 1, 101-110.

Henderson, F.M., 1963. Stability of alluvial channels. *American Society of Civil Engineers Transactions* 128, 657-720.

Herman, R., 2001. An introduction to electrical resistivity in geophysics. *Am. J. Phys.* 69, 9, 943-952.

Hey, R.D., Thorne, C.R., 1986. Stable channels with mobile gravel beds. *Journal of Hydraulic Engineering* 112, 8, 671-689.

Hickin, E.J., 1974. Development of meanders in natural river-channels. *Am. J. Sci.* 274, 414-442.

Hooke, J.M., 1987. Changes in meander morphology. In: Gardiner, V. (Ed.), *International Geomorphology*. Wiley, Chichester, pp. 591-609.

Hooke, J.M., 2007a. Spatial variability, mechanisms and propagation of change in an active meandering river. *Geomorphology* 84, 277-296.

Hooke, J.M., 2007b. Complexity, self-organisation and variation in behaviour in meandering rivers. *Geomorphology* 91, 236-258.

Hooke, J.M., Redmond, C.E., 1992. Causes and nature of river planform change. In: Billi, P., Hey, R.D., Thorne, C.R., Tacconi, P. (Eds.), *Dynamics of Gravel-Bed Rivers*. Wiley, Chichester, pp. 549-563.

Houbrechts, G., Hallot, E., Leveqc, Y., Denis, A.C., Van Campenhout, J., Peeters, A., Petit, F., 2013. Images CM de Passega des rivières ardennaises. *BSGL* 61, 37-68.

Hubschmann, J., 1975. Morphogenèse et pédogenèse quaternaires dans le piémont des Pyrénées garonnaises et ariégeoises. Thèse de doctorat, Université Toulouse - Le Mirail, France, 746 p.

Ioana-Toroimac, G., 2009. La dynamique hydrogéomorphologique de la rivière Prahova (Roumanie) : fonctionnement actuel, évolution récente et conséquences géographiques. Thèse de doctorat, Université de Bucarest, Roumanie, 341 p.

IPCC, 2014. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2014: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.), Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.

Jacob-Rousseau, N., 2009. Géohistoire/Géo-histoire : quelles méthodes pour quel récit? *Géocarrefour* 84, 4, 211-216.

James, M., 1996. Le dépérissement des boisements riverains de la Garonne: évaluation à partir de données de structure forestière et de télédétection à haute résolution spatiale. Thèse de doctorat, Université Toulouse Paul Sabatier, France, 272 p.

Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Cavailhes, J., Hilal, M., Wavresky, P., 2010. Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Cartographie, Imagerie, SIG, document 501, mis en ligne le 18 Juin 2010, consulté le 11 février 2016.

Jorda, M., 1980. Morphogenèse et évolution des paysages dans les Alpes de Haute-Provence depuis le Tardiglaciaire. Facteurs naturels et facteurs anthropiques. *Bull. Ass. Franç. Géorg.*, 472, 297-304.

-
- Julien, P., 2005. Pour mieux faire flotter les marbres : les cartes du "cours de la Garonne" dressées en 1716-1720 par Hyppolite Matis, géographe du roi. *Mémoires de la Société Archéologique du Midi de la France* LXV.
- Karr, J.R., Allan, J.D., Benke, A.C., 2000. River conservation in the United States and Canada. In: Boon, P.J., Davies, B.R., Petts, G.E. (Eds.), *Global Perspectives on River Conservation. Science, Policy and Practice*. Wiley, Chichester, pp. 3-39.
- Kiss, T., Blanka, V., 2012. River channel response to climate- and human-induced hydrological changes: Case study on the meandering Hernad River, Hungary. *Geomorphology* 175-176, 115-125.
- Knighton, A.D., 1984. *Fluvial Forms and Processes*. Edward Arnold, London.
- Knighton, A.D., Nanson, G.C., 1993. Anastomosis and the continuum of channel pattern. *Earth Surf. Proc. Land.* 18, 613-625.
- Kondolf, G.M., 1997. Hungry Water: Effect of Dams and Gravel Mining on River Channels. *Environ. Manage.* 21, 4, 533-551.
- Kondolf, G.M., Larson, M., 1995. Historical channel analysis and its application to riparian and aquatic habitat restoration. *Aquat. Conserv.* 5, 109-126.
- Kremer, K., Corella, J.P., Hilbe, M., Marillier, F., Dupuy, D., Zenhäusern, G., Girardclos, S., 2015. Changes in distal sedimentation regime of the Rhone delta system controlled by subaquatic channels (Lake Geneva, Switzerland/France. *Marine Geology* 370, 125-135.
- Krumbein, W.C., Pettijohn, F.J., 1938. *Manual of Sedimentary Petrography*. Appleton-Century-Crofts, New York.
- Laffont, J.L., 1997. *Policer la ville. Toulouse, capitale provinciale au siècle des lumières*. Thèse de doctorat, Université Toulouse II Le Mirail, France, 3 vol.
- Laigre, L., Arnaud-Fassetta, G., Reynard, E., 2011. Cartographie sectorielle et dynamique de la plaine alluviale du Rhône suisse (Tourtemagne-Sierre) depuis la fin du Petit Âge Glaciaire. In: Lambiel, C., Reynard, E., Scapozza, C. (Eds.), *La géomorphologie alpine: entre patrimoine et contrainte*. Actes du colloque de la Société Suisse de Géomorphologie, 3-5 septembre 2009, Olivone (Géovisions n°36), Institut de géographie, Université de Lausanne.
- Laigre, L., Reynard, E., Arnaud-Fassetta, G., Baron, L., Glenz, D., 2012. Caractérisation de la paléodynamique du Rhône en Valais central (Suisse) à l'aide de la tomographie de résistivité électrique. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 4, 405-426.
- Lake, P.S., 2000. Disturbance, patchiness, and diversity in streams. *J.N. Am. Benthol. Soc.* 19, 4, 573-592.
- Lambert, R., 1988. *Atlas géomorphologique du lit de la Garonne, du Pont du Roy au Bec de l'Ambès*. 46 planches couleurs au 1/25 000^e, SMEPAG, Toulouse.
- Lambert, R., 1989. La moyenne Garonne aval : géomorphologie et dynamique des crues. *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest* 60, 4, 555-567.
- Landon, N., Piégay, H., 1994. L'incision de deux affluents sub-méditerranéens du Rhône: la Drôme et l'Ardèche. *Rev. Géogr. Lyon* 1, 63-72.
- Landon, N., Piégay, H., 1999. Mise en évidence de l'ajustement d'un lit fluvial à partir de documents d'archive : le cas de la haute Drôme. *Revue de géographie alpine* 87, 3, 67-86.
- Lane, E.W., 1955. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. *Proceedings American Society of Civil Engineers* 81, 1-17.

Latapie, A., Camenen, B., Rodrigues, S., Paquier, A., Bouchard, J.P., Moatar, F., 2014. Assessing channel response of a long river influenced by human disturbance. *Catena* 121, 1-12.

Le Coz, J., 2007. Fonctionnement hydro-sédimentaire des bras morts de rivière alluviale. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 280 p.

Lefort, J., 2004. L'aventure cartographique. Belin, Paris.

Leopold, L.R., Maddock, T., 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. Report, USGS Numbered Series, 252, 57 p.

Leopold, L.B., Wolman, G., 1957. River Channel Patterns: Braided, Meandering and Straight. Geological survey professional paper 282-B, 38-83.

Leopold, L.B., Wolman, G., 1960. River meanders. *Geol. Soc. Am. Bull.* 71, 6, 769-793.

Le Roy Ladurie, E., 1967. Histoire du climat depuis l'an mil. Flammarion, Paris, 381 p.

Lescure, S., 2015. La Garonne maritime à l'Holocène : dynamique, environnements et occupation humaine. Thèse de doctorat, Université Panthéon Sorbonne (Paris 1), France.

Lévêque, C., 2001. Ecologie : de l'écosystème à la biosphère. Dunod (UniverSciences), Paris, 502 p.

Lévêque, C., Muxart, T., Abbadie, L., Weil, A., Van der Leeuw, S., 2003. L'anthroposystème : entité structurelle et fonctionnelle des interactions sociétés - milieux. In Lévêque, C., Van der Leeuw, S. (Eds), *Quelles natures voulons-nous ?*. Elsevier, Paris, pp. 110-129.

Lewin, J., 1983. Changes of channel patterns and floodplains. In: Gregory, K. (Ed), *Background to palaeohydrology*, pages 303-319.

Lewis, G., Lewin, J., 1983. Alluvial cutoffs in Wales and the Borderlands. *Spec. Publs. int. Ass. Sediment.* 6, 145-154.

Li, L., Liu, C., Mou, H., 2000. River conservation in central and eastern Asia. In: Boon, P.J., Davies, B.R., Petts, G.E. (Eds.), *Global Perspectives on River Conservation. Science, Policy and Practice*. Wiley, Chichester, pp. 263-279.

Liébault, F., Piégay, H., 2002. Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of southeastern France. *Earth Surf. Proc. Land.* 27, 425-444.

Lilin, C., 1986. Histoire de la restauration des terrains en montagne au 19^e siècle. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* XXII, 2, 139-145.

Loke, M.H., 2011. Electrical resistivity surveys and data interpretation. In Gupta, H (Ed.), *Solid Earth Geophysics Encyclopaedia (2nd Edition) "Electrical & Electromagnetic"*. Springer-Verlag, pp. 276-283.

Magdaleno, F., Fernandez-Yuste, J.A., 2011. Meander dynamics in a changing river corridor. *Geomorphology* 130, 197-207.

Makaske, B., 2001. Anastomosing rivers: a review of their classification, origin and sedimentary products. *Earth-Science Reviews* 53, 149-196.

Malard, F., Tockner, K., Dole-Olivier, M.J., Ward, J.V., 2002. A landscape perspective of surface-subsurface hydrological exchanges in river corridors. *Freshwater Biology* 47, 621-640.

Mamoudou, M., 2008. Dynamique de transfert des matières organiques et inorganiques le long du continuum fluvial de la Garonne : impact de la retenue de Malausse. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France.

-
- Maneux, E., Probst, J.L., Vessy, E., Etcheber, H., 2001. Assessment of dam trapping efficiency from water residence time: Application to fluvial sediment transport in the Adour, Dordogne, and Garonne River basins (France). *Water Resour. Res.* 37, 3, 801-811.
- Mann, M.E., 2002a. Little Ice Age. In MacCracken, M.C., Perry, J.S. (Eds.), *Encyclopedia of Global Environmental Change*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, pp. 504-509.
- Mann, M.E., 2002b. Medieval Climatic Optimum. In MacCracken, M.C., Perry, J.S. (Eds.), *Encyclopedia of Global Environmental Change*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, pp. 514-516.
- Mann, M.E., Zhang, Z., Rutherford, S., Bradley, R.S., Hughes, M.K., Shindell, D., Ammann, C., Faluvegi, G., Ni, F., 2009. Global Signatures and Dynamical Origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science* 326, 1256-1259.
- Marston, R.A., Girel, J., Pautou, G., Piégay, H., Bravard, J.P., Arneson, C., 1995. Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France. *Geomorphology* 13, 121-131.
- MEA (Millenium Ecosystem Assessment), 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water Synthesis*. World Resources Institute, Washington, DC.
- Melun, G., 2012. Evaluation des impacts hydromorphologiques du rétablissement de la continuité hydro-sédimentaire et écologique sur l'Yerres aval. Thèse de doctorat, Université de Paris Diderot, France.
- Mercier, D., (Ed.) 2013. *Géomorphologie de la France*. Dunod, Paris, 271 p.
- Mergoïl, G., 1993. Farouche ou aimable Garonne. In: Bernard, C. (Ed.), *La Garonne*. Privat, Toulouse, France.
- Métailié, J.P., 2006. La "dégradation des montagnes" au XIX^e siècle dans les Pyrénées : surexploitation pastorale, crise catastrophique, mythe, ou crise perpétuelle ? In: Beck, C., Luginbühl, Y., Muxart, T. (Eds.), *Temps et espaces des crises de l'environnement : Sociétés et ressources renouvelables*. QUAE ed., 191-210.
- Métivier, F., Barrier, L., 2012. Alluvial landscape evolution: what do we know about metamorphosis of gravel bed meandering and braided streams. In: Church, M., Biron, P., Roy, A.G. (Eds.), *Gravel-bed rivers: processes, tools, environments*. Chichester, John Wiley & Sons.
- Miall, A.D., 1977. A review of braided-river depositional environment. *Earth Science Reviews* 13, 1, 1-62.
- Miall, A.D., 1996. *The geology of fluvial deposits. Sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology*. Berlin, New-York, Springer, 582p.
- Micheli, E.R., Larsen, E.W., 2011. River channel cutoff dynamics, Sacramento River, California, USA. *River Res. Appl.* 27, 328-344
- Miramont, C., Jorda, M., Pichard, G., 1998. Evolution historique de la morphogenèse et de la dynamique fluviale d'une rivière méditerranéenne : l'exemple de la moyenne durance (France du sud-est). *Géographie physique et Quaternaire* 52, 3, 381-392.
- Montgomery, D., 2008. Dreams of natural streams. *Science* 319, 291-292.
- Morandi, B., 2014. La restauration des cours d'eau en France et à l'étranger : de la définition du concept à l'évaluation de l'action. *Eléments de recherche applicables*. Thèse de doctorat, ENS de Lyon - Université de Lyon, France.
- Morandi, B., Piégay, H., 2011. Les restaurations de rivières sur Internet : premier bilan. *Natures Sciences Sociétés* 19, 224-235.

Muller, E., Guilloy-Froget, H., Barsoum, N., Brocheton, L., 2002. *Populus nigra* L. en vallée de Garonne: legs du passé et contraintes du présent. C.R. Biologies 325, 1129-1141.

Mycielska-Dowgiallo, E., Ludwikowska-Kedzia, M., 2011. Alternative interpretations of grain-size data from Quaternary deposits. *Geologos* 17, 4, 189-203.

Nichols, G., 2013. *Sedimentology and Stratigraphy*, 2nd Edition. Wiley-Blackwell, 432 p.

Nilsson, C., Reidy, C.A., Dynesius, M., Revenga, C., 2005. Fragmentation and Flow Regulation of the World's Large River Systems. *Science* 308, 5720, 405-408.

NRC (National Research Council), 1992. *Restoration of Aquatic Ecosystems: Science, Technology, and Public Policy*, National Academies Press, 576 p.

Ollero, A., 2010. Channel changes and floodplain management in the meandering middle Ebro River, Spain. *Geomorphology* 117, 247-260.

Palmer, M.A., Bernhardt, E.S., Allan, J.D., Lake, P.S., Alexander, G., Brooks, S., Carr, J., Clayton, S., Dahm, C., Follstad Shah, J., Galat, D.J., Gloss, S., Goodwin, P., Hart, D.H., Hassett, B., Jenkinson, R., Kondolf, G.M., Lave, R., Meyer, J.L., O'Donnell, T.K., Pagano, L., Srivastava, P., Suddth, E., 2005. Standards for ecologically successful river restoration. *Journal of Applied Ecology* 42, 208-217.

Pardé, M., 1928. Périodicité des grandes inondations et crues exceptionnelles. *Revue de géographie alpine* 16, 2, 499-519.

Pardé, M., 1935. Le régime de la Garonne. *Revue de géographie des Pyrénées et du Sud-Ouest* 6, 2, 105-262.

Passega, R., 1957. Texture as characteristic of clastic deposition. *AAPG Bulletin* 41, 9, 1952-1984.

Passega, R., 1964. Grain size representation by CM patterns as a geological tool. *J. sediment. petrol.* 34, 4, 830-847.

Passerat, G., 1991, Mille ans d'histoire des verdunois. *Bulletin de la Société archéologique du Tarn-et-Garonne* CXVI, 162-176.

Paustian, S.J., Anderson, K., Blanchet, D., 1992. A channel type user guide for the Tongass National Forest, southeast Alaska. *USDA Forest Service, Alaska Region, Technical Paper R10-TP-26*, 179 p.

Payraudeau, S., Galliot, N., Lliébault, F., Auzet, A.V., 2010. Incertitudes associées aux données géographiques pour la quantification des vitesses de migration des méandres. Application à la basse vallée de la Bruche. *Revue Internationale de Géomatique* 20, 2, 221-243.

Peiry, J.L., 1986. Dynamique fluviale historique et contemporaine du confluent Giffre-Arve (Haute-Savoie). *Rev. Géogr. Lyon* 1, 79-96.

Peiry, J.L., 1988. Approche géographique de la dynamique spatio-temporelle des sédiments : l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve (Haute-Savoie). Thèse de doctorat, Université Lyon 3, France, 478 p.

Peiry, J.L., Nougier, F., 1994. Le Drac dans l'agglomération de Grenoble: première évaluation des changements géomorphologiques contemporains. *Revue de Géographie Alpine* 82, 2, 77-96.

Petts, G.E., 1979. Complex response of river channel morphology subsequent to reservoir construction. *Progress in Physical Geography* 3, 329-362.

Petts, G.E., Gurnell, A.M., 2005. Dams and geomorphology: research progress and future directions. *Geomorphology* 71, 27-47.

- Piégay, H., Bornette, G., Citterio, A., Hérouin, E., Moulin, B., Statiotis, C., 2000. Channel instability as a control on silting dynamics and vegetation patterns within perfluvial aquatic zones. *Hydrol. Process.* 14, 3011-3029.
- Piégay, H., Grant, G., Nakamura, F., Trustrum, N., 2006. Braided River Management: from Assessment of River Behaviour to improved Sustainable Development. In: Sambrook Smith, G.H., Best, J.M., Bristow, S., Petts, G.E. (Eds.), *Braided Rivers: Process, Deposits, Ecology and Management*. Blackwell Publishing Ltd., Oxford, UK.
- Piégay, H., Naylor, L.A., Haidvogel, G., Kail, J., Schmitt, L., Bourdin, L., 2008. Integrative River Science and Rehabilitation: European Experiences. In: Brierley, G., Kirstie, F. (Eds.), *River Futures: An Integrative Scientific Approach to River Repair*. pp. 201-219.
- Plumejeaud, C., Vouloir, M.C., 2012. Contenu de la carte d'Etat-Major et sa modélisation en vue de sa vectorisation. Rapport n° L2.1-3, projet GeoPeuple, 108 p.
- Provansal, M., Dufour, S., Sabatier, F., Anthony, E.J., Raccasi, G., Robresco, S., 2014. The geomorphic evolution and sediment balance of the lower Rhône River (southern France) over the last 130 years: hydropower dams versus other control factors. *Geomorphology* 219, 27-41.
- Puech, C., Baudry, J., Joannon, A., Poggi, S., Aviron, S., 2014. Organic vs. conventional farming dichotomy: does it make sense for natural enemies? *Agric. Ecosyst. Environ.* 194, 48-57.
- Radoane, M., Obreja, F., Cristea, I., Mihaila, D., 2013. Changes in the channel-bed level of the eastern Carpathian rivers: climatic vs. human control over the last 50 years. *Geomorphology* 193, 91-111.
- Rapinel, S., 2012. Contribution de la télédétection à l'évaluation des fonctions des zones humides : De l'observation à la modélisation prospective. Thèse de doctorat, Université de Rennes, France.
- Reid, H.E., Brierley, G.J., 2015. Assessing geomorphic sensitivity in relation to river capacity for adjustment. *Geomorphology* 251, 108-121.
- Rinaldi, M., Wyzga B., Dufour, S., Bertoldi, W., Gurnell, A., 2013. River Processes and Implications for Fluvial Ecogeomorphology: A European Perspective. In: Shroder, J.F. (Ed.-in-chief), Butler, D.R., Hupp, C.R., (Volume Eds.), *Treatise on Geomorphology*, vol 12, Ecogeomorphology, San Diego, Academic Press, 37-52.
- Robbins, C.H., Simon, A., 1983. Man-induced channel adjustment in Tennessee streams. USGS Water-Resources Investigations Report 82, 4098, 129 p.
- Rollet, A.J., 2007. Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain. Thèse de doctorat, Université Jean Moulin Lyon 3, France.
- Rollet, A.J., Piégay, H., Lejot, J., Citterio, A., Dufour, S., 2005. Expertise hydrogéomorphologique en vue du diagnostic fonctionnel des habitats, de la restauration du transit sédimentaire et des îlots. Rapport du programme LIFE Nature, Action A12, 172 p.
- Rosgen, D., 1994. A classification of natural rivers. *Catena* 22, 169-199.
- Rotnicki, A., 1991. Retrodiction and paleodischarges of meandering and sinuous alluvial rivers and its palaeohydroclimatic implications. In: Starkel, L., Gregory, K.J., Thorne, J.B., (Eds.), *Temperate Palaeohydrology*. John Wiley and Sons, Chichester, pp. 431-471.
- Roux, A.L. (Ed.), 1982. Cartographie polythématique appliquée à la gestion écologique des eaux : étude d'un hydrosystème fluvial : le Haut Rhône français. Edit. CNRS, Centre Région. Publ. Lyon, 116 p.
- Ruddiman, W.F., 2013. The Anthropocene. *Annu. Rev. Earth Pl. Sc.* 41, 45-68.

Ruffinoni, C., Trémolières, M., Sanchez-Pérez, J.M., 2003. Végétation alluviale et flux de nutriments : des liens interactifs. In: Piégay, H., Pautou, G., Ruffinoni, C., Les forêts riveraines des cours d'eau. IDF édit, Paris, pp 134-154.

Rumeau, 1879. Monographie de la ville de Grenade. Toulouse, Regnault, 96 p.

Rumsby, B.T., Macklin, M.G., 1996. European river response to climate changes over the last neoglacial cycle (the 'Little Ice Age'). In: Branson, J., Brown, A.G., Gregory, K.J. (Eds.), Global Continental Changes: The Contexte of Paleohydrology Geological Society Special Publication 115. Geological Society, London, pp. 217-233.

Rundle, A.S., 1985. Braid morphology and the formation of multiple channels. The Rakaia, New Zeland. Z. Geomorphol. N.F. Suppl. Bd 55, 15-37.

Rust, B.R., 1978. Depositional models for braided alluvium. In: Miall, A. (Ed.), Fluvial Sedimentology. Canadian Society of Petroleum Geologists, Calgary, Alberta, pp. 605-625.

Salomon, F., 2013. Géoarchéologie du delta du Tibre : Evolution géomorphologique holocène et contraintes hydrosédimentaires dans le système Ostie-Portus. Thèse de doctorat, Université de Lyon 2, France.

Salvador, P.G., Berger, J.F., 2014. The evolution of the Rhone River in the Basses Terres basin during the Holocene (Alpine foothills, France). Geomorphology 204, 71-85.

Sambrook Smith, G.H., Best, J.L., Bristow, C.S., Petts, G.E. (Eds.), 2006. Braided Rivers: Process, Deposits, Ecology and Management. Blackwell Publishing Ltd., Oxford, UK, 393 p.

Sauvage, S., 1999. Modélisation hydrobiogéochimique de la Garonne à l'étiage estival : cas de l'azote entre Toulouse et Agen (120 kilomètres). Thèse de doctorat, INP Toulouse, France.

Sauvage, S., Teissier, S., Vervier, P., Améziane, T., Garabétian, F., Delmas, F., Caussade, B., 2003. A numerical tool to integrate biophysical diversity of a large regulated river: hydrobiogeochemical bases. The case of the Garonne River (France). River Research and Applications 19, 181-198.

Scapozza, C., Oppizzi, P., 2013. Evolution morpho-sédimentaire et paléo-environnementale de la plaine fluviodeltaïque du Ticino pendant l'Holocène récent (Canton du Tessin, Suisse). Géomorphologie : relief, processus, environnement 3, 265-286.

Schmidt, J.C., Wilcock, P.R., 2008. Metrics for assessing the downstream effects of dams. Water Ressources Research 44.

Schmitt, L., Roy, D., Trémolières, M., Blum, C., Dister, E., Pfarr, U., Späth, V., 2012. 30 years of restoration works on the two sides of the Upper Rhine River: feedback and future challenges. Final Proc. Int. Conf. Integrative Sciences and Sustainable Development of Rivers. Lyon, France, pp. 101-103.

Schnitzler-Lenoble, A., 2002. Ecologie des forêts naturelles d'Europe. Biodiversité, sylvigénèse, valeur patrimoniale des forêts primaires. Lavoisier, 271 p.

Schnitzler-Lenoble, A., Carbiener, R., 2007. Forêts alluviales d'Europe : écologie, biogéographie, valeur intrinsèque. Broché, 386 p.

Schumm, S.A., 1963. Sinuosity of alluvial rivers in the Great Plains. Bulletin of Geological Society of America 74, 1089-110.

Schumm, S.A., 1968. Speculations concerning paleohydrologic controls of terrestrial sedimentation. Geological Society of America Bulletin 79, 1573-1588.

Schumm, S.A., 1969. River metamorphosis. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division 95, 255-273.

- Schumm, S.A., 1977. The fluvial system. Wiley, New York.
- Schumm, S.A., 1981. Evolution and response of the fluvial system, sedimentological implications. In: Ethridge, F.G., Flores, R.M. (Eds.), Recent and Nonmarine Depositional Environments. SEPM (Society for Sedimentary Geology), Special Publication 31, Tulsa, OK, 19-29.
- Schumm, S.A., 1985. Patterns of alluvial rivers. *Annu. Rev. Earth Pl. Sc.* 13, 5-27.
- Schumm, S.A., Lichty, R.W., 1965. Time, space, and causality in geomorphology. *Am. J. Sci.* 263, 110-119.
- Scorpio, V., Aucelli, P.P.C., Giano, S.I., Pisano, L., Robustelli, G., Roskopf, C.M., Schiatterella, M., 2015. River channel adjustments in Southern Italy over the past 150 Years and implications for channel recovery geomorphology. *Geomorphology*, 251, 77-90.
- Segura-Beltrán, F., Sanchis-Ibor, C., 2013. Assessment of channel changes in a Mediterranean ephemeral stream since the early twentieth century. The Rambla de Cervera, eastern Spain. *Geomorphology* 201, 199-214.
- Seppelt, R., Dormann, C.F., Eppink, F.V., Lautenbach, S., Schmidt, S., 2011. A quantitative review of ecosystem service studies: approaches, shortcomings and the road ahead. *Journal of Applied Ecology* 48, 630-636.
- Serret, J., 1874. Les débordements de la Garonne dans l'Agenais depuis les temps anciens jusqu'à nos jours. Impr. Prosper Noubel, Agen, 29 p.
- Shields, F., Abt, S., 1989. Sediment deposition in cutoff meander bends and implications for effective managements. *Regul. River* 4, 381-396.
- Shields, F.D., Knight, S.S., Cooper, C.M., 1997. Rehabilitation of warmwater stream ecosystems following channel incision. *Ecological Engineering* 8, 2, 93-116.
- Simon, A., Darby, S.E. (Eds.), 1999. Incised River Channels. Wiley, Chichester, UK.
- Simons, H.E.J., Bakker, C., Schropp, M.H.I., Jans, L.H., Kok, F.R., Grift, R.E., 2001. Man-made secondary channels along the River Rhine (the Netherlands): results of post-project monitoring. *Regul. River* 17, 473-491.
- Skarpich, V., Hradecky, J., Dusek, R., 2013. Complex transformation of the geomorphic regime of channels in the forefield of the Moravskoslezské Beskydy Mts.: Case study of the Morava River (Czech Republic). *Catena* 111, 25-40.
- SMEPAG (Syndicat Mixte d'Etude et de Programmation pour l'Aménagement de la Garonne) 1989. Monographie des crues de la Garonne, CACG, UTM, CARA, UB, 168 p.
- Smith, N.D., 1972. Some sedimentological aspects of planar cross-stratification in a sandy braided river. *J. Sediment. Petrol* 42, 624-634.
- Smith, D.G., 1983. Anastomosed fluvial deposits: modern examples from Western Canada. In: Collinson, J., Lewin, J. (Eds.), Modern and Ancient Fluvial Systems. Special Publication of the International Association of Sedimentologists 6, Blackwell, Oxford, pp. 155-168.
- Souchon, Y., Nicolas, V., 2011. Barrages et seuils : principaux impacts environnementaux. Rapport final. Onema, Cemagref, 28 p.
- Soudart, M., Mahé, J., 1975. Etude granulométrique par l'analyse factorielle des correspondances : application aux sables des formations superficielles du Sud-Ouest de Madagascar. *C.R. Acad. Sci.* 280, série D, 2207-2210.

Standford, J.A., Ward, J.V., Liss, W.J., Frissell, C.A., Williams, R.N., Lichatowich, J.A., Coutant, C.C., 1996. A general protocol for restoration of regulated rivers. *Regul. River* 12, 4-5, 391-413.

Stange, K.M., Van Balen, R.T., Kasse, C., Vandenberghe, J., Carcaillet, J., 2013. Linking morphology across the glaciofluvial interface: a ¹⁰Be supported chronology of glacier advances and terrace formation in the Garonne River, northern Pyrenees, France. *Geomorphology* 207, 71-95.

Steffen, W., Grinevald, J., Crutzen, P., McNeill, J., 2011. The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. *Phil. Trans. R. Soc. A* 369, 842-867.

Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., Ludwig, C., 2015. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *Anthropocene Review*.

Steiger, J., Gazelle, F., 1994. Evolution contemporaine d'un paysage fluvial sous l'effet de la dynamique des crues et des impacts humains. *Crues et Inondations, Congrès de la Société Hydrotechnique de France, 23eme Journée de l'Hydraulique*, pp. 289-296.

Steiger, J., Corenblit, D., 2000. Dynamique fluviale de la Garonne toulousaine. Agence de l'eau Adour-Garonne, technical report.

Steiger, J., Gurnell, A.M., 2002. Spatial hydrogeomorphological influences on sediment and nutrient deposition in riparian zones: observations from the Garonne River, France. *Geomorphology* 49, 1-23.

Steiger, J., James, M., Gazelle, F., 1998. Channelization and consequences on floodplain system functioning on the Garonne River, SW France. *Regul. River* 14, 1, 13-23.

Steiger, J., Corenblit, D., Vervier, P., 2000. Les ajustements morphologiques contemporains du lit mineur de la Garonne, France et leurs effets sur l'hydrosystème fluvial. *Z. Geomorphol., N.F., Suppl.* 122, 227-246.

Stølum, H.H., 1996. River meandering as a self-organisation process. *Science* 271, 1710-1713.

Stølum, H.H., 1998. Planform geometry and dynamics of meandering rivers. *Geological Society of America Bulletin* 110, 1485-1498..

Suding, K.N., Gross, K.L., Houseman, G.R., 2004. Alternative states and positive feedbacks in restoration ecology. *Trends Ecol. Evol.* 19, 1, 46-53.

Surian, N., 1999. Channel changes due to river regulation: the case of the Piave River, Italy. *Earth Surf. Proc. Land* 24, 12, 1135-1151.

Surian, N., Rinaldi, M., 2003. Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology* 50, 307-326.

Surian, N., Rinaldi, M., 2004. Channel adjustments in response to human alteration of sediment fluxes: examples from Italian rivers. In: Golosov, V., Belyaev, V., Walling, D.E. (Eds.), *Sediment Transfer through the Fluvial System, Proc. Symposium and Moscow, August 2004* 288. IAHS Publ., pp. 276-282.

Tockner, K., Schiemer, F., Ward, J.V., 1998. Conservation by restoration: the management concept for a river-floodplain system on the Danube River in Austria. *Aquatic. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 8, 71-86.

Toone, J., Rice, S.P., Piégay, H., 2014. Spatial discontinuity and temporal evolution of channel morphology along a mixed bedrock-alluvial river, upper Drôme River, southeast France: contingent responses to external and internal controls. *Geomorphology* 205, 5-16.

Tricart, J., Bravard, J.P., 1991. L'aménagement des trois plus grands fleuves européens : Rhin, Rhône et Danube. *Problèmes et méfaits. Annales de Géographie* 100, 561-562, 668-713.

-
- Tucker, M.E., 1996. *Sedimentary Rocks in the Field* (2nd edition). Wiley, Chichester, 153 p.
- Udden, J.A., 1914. Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the Geological Society of America*, 25, 655-744.
- Uribelarrea, D., Pérez-Gonzalez, A., Benito, G., 2003. Channel changes in the Jarama and Tagus rivers (Central Spain) over the past 500 years. *Quaternary Sci. Rev.* 22, 20, 2209-2221.
- Valette, P., 2002. *Les paysages de la Garonne: les métamorphoses d'un fleuve (entre Toulouse and Castet-en-Dorthe)*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France.
- Valette, P., 2004. Les cartes et plans de la moyenne Garonne de l'époque moderne à nos jours. *CFC* 182, 41-50.
- Valette, P., 2013. La Garonne de la période moderne à aujourd'hui : histoire des aménagements, des usages et évolution du lit. Rapport du programme Galet, Première partie, 54 p.
- Valette, P., Gazelle, F., 2000. L'impact des sociétés du XVIII^e et du XIX^e s. sur les paysages garonnais. *Géocarrefour* 75 4, 337-345.
- Valette, P., Carozza, J.M., 2010. Mise en œuvre d'une démarche géohistorique pour la connaissance de l'évolution des paysages fluviaux : l'exemple de la moyenne vallée de la Garonne. *Géocarrefour* 85 1, 17-27.
- Valette, P., Carozza, J.M., 2013. Toulouse face à la Garonne : emprise de l'urbanisation dans la plaine inondable et géohistoire des aménagements fluviaux. *Geographica*, 177-203.
- Valette, P., Carozza, J.M., Salles, D., David, M., Simonet, G., 2014. Construction géohistorique du "sauvage" de la Garonne toulousaine : quelle part de naturalité dans les paysages fluviaux? *Développement Durable & Territoires* 5, 3.
- Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cummins, K.W., Sedell, J.R., Crishing, C.E., 1980. The river continuum concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 37, 130-137.
- Walsh, C., Roy, A.H., Feminella, J.W., Cottingham, P.D., Groffman, P.M., Morgan, R.P., 2005. The urban stream syndrome: current knowledge and search for a cure. *J. N. Am. Benthol. Soc.* 24, 3, 706-723.
- Wang S.J., Ni, J.R., 2002. Straight river: its formation and speciality. *Journal of Geographical Sciences* 12, 1, 72-80.
- Ward, J.V., Bretschko, G., Brunke, M., Danielopol, D., Gibert, J., Conser, T., Hildrew, A.G., 1998. The boundaries of river systems: the metazoan perspective, *Freshwater Biology* 40, 531-569.
- Warner, R.F., 2000. Gross channel changes along the Durance river, southern France, over the last 100 years using cartographic data. *Regul. River* 16, 141-157.
- Wasson, J.G., Malavoi, J.R., Maridet, L., Souchon, Y., Paulin, L., 1995. Impacts écologiques de la chenalisation des rivières. Rapport final. Epteau, Cemagref, Saint-Fons, Lyon, 166 p.
- Wentworth, C.K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *J. Geol.*, 30, 377-392.
- Westman, W.E., 1977. How Much Are Nature's Services Worth? *Science* 197, 4307, 960-964.
- White, D.S., 1993. Perspectives on defining and delineating hyporheic zones. *J. N. Am. Benthol. Soc.* 12, 61-69.
- Williams, G.P., Wolman, M.G., 1984. Downstream effects of dams on alluvial rivers. USGS circular 781, 48 p.

Willis, K., Araujo, M.B., Bennett, K.D., Figueroa-Rangel, B., Froyd, C.A., Meyers, N., 2007. How can a knowledge of the past help to conserve the future? Biodiversity conservation and the relevance of long-term ecological studies. *Phi. Trans. R. Soc. B.*, 362, 175-186.

Winterbottom, S.J., 2000. Medium and short-term channel planform changes on the Rivers Tay and Tummel, Scotland. *Geomorphology* 34, 3-4, 195-208.

Wolman, M.G., 1967. A cycle of sedimentation and erosion in urban river channels. *Geografiska Annaler* 49A, 385-395.

Xoplaki, E., Fleitmann, D., Diaz, H., Von Gunten, L., Kiefer, T., 2011. Medieval Climate Anomaly. *Pages News* 19, 40 p.

Zanoni, L., Gurnell, A., Drake, N., Surian, N., 2008. Island dynamics in a braided river from analysis of historical maps and air photographs. *River. Res. Applic.* 24, 8, 1141-1159.

Zawiejska, J., Wyzga, B., 2010. Twentieth-century channel change on the Dunajec River, southern Poland: Patterns, causes and controls. *Geomorphology* 117, 234-246.

Ziliani, L., Surian, N., 2012. Evolutionary trajectory of channel morphology and controlling factors in a large gravel-bed river. *Geomorphology* 173-174, 104-117.

Sites web et Bases de données en ligne

Archives Toulouse. Archives en ligne de la commune de Toulouse. Dernière connexion : le 26 Avril 2016. URL : <http://www.archives.toulouse.fr/>

CATeZH Garonne (Cellule d'Assistance Technique à la gestion des Zones Humides de Garonne). Dernière connexion : le 26 Avril 2016. URL : <http://www.catezh.naturemp.org/>.

DCE, 2000. Directive n°2000/60/CE du 23/10/00 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Dernière connexion : le 26 Avril 2016. URL : http://www.ineris.fr/aida/consultation_document/995.

Eaufrance. Service public d'information sur l'eau. Dernière connexion : le 26 Avril 2016. URL : <http://www.eaufrance.fr/comprendre/la-politique-publique-de-l-eau/la-directive-cadre-sur-l-eau>.

FAO (Food and Agriculture Organization), AQUASTAT. Système d'information mondial sur l'eau. Dernière connexion : le 20 Avril 2016. URL : <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>.

Géoportail. Base de données géographiques du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Dernière connexion : le 20 Avril 2016. URL : <http://www.geoportail.gouv.fr/accueil>.

HYDRO. Base de données hydrologiques du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Dernière connexion : le 20 Avril 2016. URL : <http://www.hydro.eaufrance.fr/selection.php?consulte=rechercher>.

IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme). Base de données sur la grande accélération. Dernière connexion : le 26 Avril 2016. URL : <http://www.igbp.net/globalchange/greatacceleration.4.1b8ae20512db692f2a680001630.html>.

IGN, BD ALTI®. Modèle numérique de terrain (MNT) maillé qui décrit le relief du territoire français à moyenne échelle, mis à disposition sur l'espace professionnel du site de l'IGN. Dernière connexion : le 26 Avril 2016. URL : <http://professionnels.ign.fr/bdalti>.

IGN, GEOFLA®. Découpage administratif national (France métropolitaine et DOM), mis en ligne sur l'espace professionnel du site de l'IGN. Dernière connexion : le 26 Avril 2016. URL : <http://professionnels.ign.fr/geofla>.

IGN, PROFILS. Profils longitudinaux relevés et dressés par le Service de Nivellement Général de la France sur les indications et pour le compte du Service des Grandes Forces Hydrauliques (dernières mises à jour en 1987). Profils mis en ligne sur le serveur de fiches géodésiques de l'IGN. Dernière connexion : le 26 Avril 2016. URL : http://geodesie.ign.fr/fiches/index.php?module=e&action=e_profils&context=accueil.

IGN, Scan25®. Image numérique continue sur tout le territoire français des cartes IGN au 1 : 25000, mis à disposition sur l'espace professionnel du site de l'IGN. Dernière connexion : le 26 Avril 2016. URL : <http://professionnels.ign.fr/scan25>.

Info Terre - Base de données du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). Dernière connexion : le 17 Novembre 2015. URL : <http://infoterre.brgm.fr/viewer/MainTileForward.do;jsessionid=B38C18332877C45C1038FBD5B6BB0505>.

Mairie de Ondes. Site officiel de la mairie de Ondes. Dernière connexion : le 26 Avril 2016. URL : <http://www.mairie-ondes31.fr/fr/la-commune-decouvrir-la-ville/historique.html>

Sandre, BD CARTHAGE®. Base de données complète du réseau hydrographique français, téléchargeable gratuitement sur le site du Sandre (Service d'administration national des données et référentiels sur l'eau). Dernière connexion : le 26 Avril 2016. URL : <http://www.sandre.eaufrance.fr/>.

SIE Adour-Garonne (Système d'information sur l'eau du Bassin Adour Garonne). Dernière connexion : le 26 Avril 2016. URL : <http://adour-garonne.eaufrance.fr/>

USDA (United State Department of Agriculture). Dernière connexion : le 26 Avril 2016. URL : <http://www.usda.gov/wps/portal/usda/usdahome>.

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1.1 : <i>The idealized fluvial system</i> (modifié d'après Schumm, 1977)..... | 15 |
| Figure 1.2 : L'hydrosystème fluvial (Amoros et Petts, 1993)..... | 16 |
| Figure 1.3 : Balance de Lane (modifié d'après l'USDA)..... | 17 |
| Figure 1.4 : Classification de référence des styles fluviaux (Amoros et Petts, 1993, d'après la classification de Rust, 1978)..... | 19 |
| Figure 1.5 : Exemples de classification des styles fluviaux..... | 20 |
| Figure 1.6 : Distribution schématique des communautés faunistiques le long du profil longitudinal d'un fleuve, modifié d'après Amoros et Petts (1993)..... | 21 |
| Figure 1.7 : Représentation d'une succession végétale de plaine alluviale (Barnaud et Fustec, 2007)..... | 22 |
| Figure 1.8 : Modèle d'états alternatifs (modifié d'après Suding et al., 2004)..... | 24 |
| Figure 1.9 : Synthèse des principaux types d'ajustement observés sur les cours d'eau italiens au cours des 100 dernières années (modifié d'après Rinaldi et al., 2013 et Surian et Rinaldi, 2003)..... | 26 |
| Figure 1.10 : Représentation de quatre indicateurs de la grande accélération..... | 27 |
| Figure 1.11 : Reconstruction des températures de surface au cours des 1500 dernières années (modifié d'après Mann et al., 2009)..... | 29 |
| Figure 1.12 : Implication de la trajectoire historique dans les démarches de restauration..... | 33 |
| Figure 2.1 : Localisation et délimitation du bassin versant de la Garonne et du linéaire fluvial étudié, <i>i.e.</i> , la Garonne toulousaine..... | 35 |
| Figure 2.2 : Organisation morphostructurale du bassin versant de la Garonne mise en évidence par la topographie et la lithologie..... | 36 |
| Figure 2.3 : Typologie climatique du territoire français en 8 classes (modifié d'après Joly et al., 2010)..... | 37 |
| Figure 2.4 : Typologie hydromorphologique de la Garonne..... | 38 |
| Figure 2.5 : Délimitation de la Garonne toulousaine et de son bassin versant..... | 39 |
| Figure 2.6 : Carte géomorphologique de la vallée de la Garonne toulousaine..... | 40 |
| Figure 2.7 : Localisation des communes dans la plaine de la Garonne toulousaine..... | 41 |
| Figure 2.8 : Profil longitudinal de la Garonne toulousaine (Steiger et al., 1998)..... | 42 |
| Figure 2.9 : Etat des berges et du fond le long de la Garonne toulousaine..... | 43 |
| Figure 2.10 : Débits mensuels moyens enregistrés aux stations de Toulouse-Portet et Verdun-sur-Garonne..... | 44 |
| Figure 2.11 : Dégâts causés par la crue du 25-26 Janvier 2014 sur les berges et la plaine de la Garonne toulousaine..... | 45 |
| Figure 2.12 : Extractions de granulat dans le lit mineur de la Garonne (modifié d'après Beaudelin, 1989)..... | 47 |
| Figure 2.13 : Synthèse des travaux de stabilisation des berges réalisés dans le département du Tarn-et-Garonne entre 1960 et 1984 (modifié d'après Valette, 2002)..... | 47 |
| Figure 2.14 : Barrages hydro-électriques sur le cours de la Garonne montagnarde (modifié d'après Sauvage et al., 2003)..... | 48 |
| Figure 3.1 : Aménagements et usages historiques du lit de la Garonne toulousaine..... | 57 |

| | |
|--|-----|
| Figure 3.2 : Chroniques climatiques. | 58 |
| Figure 3.3 : Représentation du chenal de la Garonne dans le secteur de Grenade/Ondes, datée de 1812..... | 59 |
| Figure 3.4 : Evolution des sites de Grenade (Valette et Gazelle, 2000) et Cordes-Tolosannes (Valette et Carozza, 2010)..... | 60 |
| Figure 3.5 : Echelles d'analyse de l'approche géohistorique..... | 62 |
| Figure 3.6 : Echelles d'analyse du couplage sources cartographiques / données de terrain | 62 |
| Figure 3.7 : Représentation schématique de deux types de recoupement de méandre (Amoros et Petts, 1993).. | 63 |
| Figure 4.1 : Représentation schématique de la démarche méthodologique adoptée pour analyser l'évolution de la dynamique fluviale garonnaise à partir de documents cartographiques historiques..... | 69 |
| Figure 4.2 : Inventaire des cartes du corpus documentaire. | 70 |
| Figure 4.3 : Carte de Matis (1716-1717) - nord de Toulouse | 73 |
| Figure 4.4 : Carte de Villacrose (1755) - nord de Toulouse | 73 |
| Figure 4.5 : Cartes de la seconde moitié du XVIII ^e siècle. | 74 |
| Figure 4.6 : Carte anonyme de 1810 - Toulouse. | 75 |
| Figure 4.7 : Carte anonyme de 1833 - nord de Toulouse. | 75 |
| Figure 4.8 : Carte des Ponts et Chaussées de 1862 - secteur de Verdun-sur-Garonne..... | 76 |
| Figure 4.9 : Carte anonyme de 1868 - Toulouse. | 76 |
| Figure 4.10 : Couvertures, échelles et dates de levée et de révision des cartes d'Etat-Major..... | 77 |
| Figure 4.11 : Carte d'Etat-Major des années 1848-1850 - nord de Toulouse..... | 78 |
| Figure 4.12: Carte d'Etat-Major des années 1900-1909 - nord de Toulouse..... | 79 |
| Figure 4.13 : Comparaison des crues de la décennie 1940 avec celles des décennies précédente et ultérieure. 80 | |
| Figure 4.14 : Cartes IGN des années 1940..... | 81 |
| Figure 4.15 : Planche Toulouse Ouest 3-4 et dates/couvertures des différentes planches des années 1970..... | 82 |
| Figure 4.16 : Scan25® - Toulouse nord..... | 83 |
| Figure 4.17 : Formes fluviales digitalisées et leurs légendes sur les cartes couvrant la période 1868-2000..... | 85 |
| Figure 4.18 : Méthode de segmentation de la basse plaine en tronçons de mesure de 1 km de longueur..... | 86 |
| Figure 4.19 : Méthode de calcul des indices géomorphométriques..... | 88 |
| Figure 4.20 : Formes d'ajustement..... | 91 |
| Figure 5.1: Les trois types de résultats issus de l'analyse des formes fluviales à partir des documents cartographiques historiques..... | 95 |
| Figure 5.2 : Evolution des variables mesurées/calculées à l'échelle du linéaire..... | 96 |
| Figure 5.3 : Cercles des corrélations pour les variables quantitatives et cartes des modalités pour les variables qualitatives..... | 98 |
| Figure 5.4: Dendrogramme montrant l'organisation des classes de la CAH | 99 |
| Figure 5.5 : Typologie dynamique des formes fluviales. | 100 |
| Figure 5.6 : Trajectoire d'évolution des zones Z1 à Z4 entre 1868 et les années 2000.. | 103 |

| | |
|---|-----|
| Figure 5.7 : Trajectoire d'évolution des zones Z1 à Z4 entre 1750 et 1868..... | 107 |
| Figure 6.1 : Représentation synthétique des quatre modèles de fonctionnement hydro-sédimentaire via quatre indices..... | 112 |
| Figure 6.2 : Evolution des différentes zones au regard de trois indices..... | 113 |
| Figure 6.3 : Processus par lesquels les modèles fluviaux se sont homogénéisés et simplifiés..... | 114 |
| Figure 6.4 : Chronologie de l'évolution des modèles de fonctionnement hydro-sédimentaire..... | 115 |
| Figure 7.1 : Démarche d'analyse multiscalaire mise en oeuvre dans la partie 3..... | 121 |
| Figure 7.2 : Localisation des secteurs d'étude le long de la Garonne toulousaine..... | 122 |
| Figure 7.3 : Photographie aérienne et limites administratives du secteur de Grenade/Ondes..... | 123 |
| Figure 7.4 : Organisation hydro-géomorphologique du secteur de Grenade/Ondes..... | 124 |
| Figure 7.5 : Fermeture de bras secondaires dans le secteur de Grenade/Ondes (modifié d'après Valette et Gazelle, 2000)..... | 124 |
| Figure 7.6 : Evolution en plan du chenal dans le secteur de Grenade/Ondes, reconstituée à partir des cartes historiques présentées dans le chapitre 4..... | 125 |
| Figure 7.7 : Position des sites d'étude du secteur de Grenade/Ondes..... | 126 |
| Figure 7.8 : Photographie aérienne et limites administratives du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale..... | 127 |
| Figure 7.9 : Organisation hydro-géomorphologique du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale..... | 128 |
| Figure 7.10 : Evolution en plan du chenal dans le secteur de Verdun/Dieupentale, reconstituée à partir des cartes historiques présentées dans le chapitre 4..... | 129 |
| Figure 7.11 : Position des sites d'étude du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale..... | 130 |
| Figure 7.12 : Photographie aérienne et limites administratives du secteur de Cordes/Saint-Porquier..... | 131 |
| Figure 7.13 : Organisation hydro-géomorphologique du secteur de Cordes/Saint-Porquier..... | 131 |
| Figure 7.14 : Evolution du lit de la Garonne entre 1940 et 1984 au niveau de Cordes-Tolosannes (modifié d'après Valette et Carozza, 2010)..... | 132 |
| Figure 7.15 : Evolutions en plan du chenal dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier reconstituées à partir des cartes historiques présentées dans le chapitre 4..... | 133 |
| Figure 7.16 : Position des sites d'étude du secteur de Cordes-Tolosannes / Saint-Porquier..... | 134 |
| Figure 7.17 : Stratégie de prospection sédimentaire..... | 135 |
| Figure 7.18 : Photographies montrant les techniques et outils utilisés pour le prélèvement des carottes et échantillons sédimentaires..... | 136 |
| Figure 7.19 : Exemple de fiche pour le dressage d'un log et légende associée (modifié d'après Nichols, 2013)..... | 137 |
| Figure 7.20 : Photographies montrant la préparation et l'analyse granulométrique des échantillons sédimentaires..... | 138 |
| Figure 7.21 : Refroidissement des creusets contenant les échantillons de sédiments après 4 h de cuisson à 550° dans le four à moufle..... | 139 |
| Figure 7.22 : Résultats du traitement des données granulométriques par ACP/CAH..... | 140 |
| Figure 7.23 : Indices granulométriques pour chaque classe issue de l'ACP/CAH..... | 141 |
| Figure 7.24 : Résultats de l'analyse des teneurs en carbone..... | 141 |

| | |
|--|-----|
| Figure 7.25 : Principe des mesures de résistivité électrique (modifié d'après Herman, 2001)..... | 142 |
| Figure 7.26 : Stratégie de prospection géophysique. | 143 |
| Figure 7.27 : Photographies du matériel utilisé pour les mesures de résistivité électrique..... | 143 |
| Figure 7.28 : Photographies des sessions de mesures topographiques..... | 144 |
| Figure 7.29 : Modèle numérique de terrain haute résolution (1 m)..... | 144 |
| Figure 7.30 : Eléments de géométrie hydraulique qui caractérisent un paléochenal. | 145 |
| Figure 7.31 : Eléments pris en compte dans la définition du stade de comblement et de la vitesse de sédimentation..... | 147 |
| Figure 7.32 : Faciès sédimentaires identifiés dans la plaine de la Garonne et nommés d'après le référentiel de Miall (1996)..... | 148 |
| Figure 7.33 : Image CM (modifié d'après Passega, 1964)..... | 149 |
| Figure 7.34 : Image CM définie à partir des échantillons de sédiment prélevés dans la plaine de la Garonne toulousaine | 150 |
| Figure 8.1 : MNT haute résolution (1 m) du secteur de Grenade/Ondes | 154 |
| Figure 8.2 : Profil topographique levé à partir du MNT sur le site GRE. | 154 |
| Figure 8.3 : Profils topographiques levés à partir du MNT sur les sites SESC, STRO et OND. | 155 |
| Figure 8.4 : TRE levées dans le secteur de Grenade/Ondes..... | 157 |
| Figure 8.5 : Délimitation des sections mouillées à plein bord à partir des TRE levées dans le secteur de Grenade/Ondes..... | 159 |
| Figure 8.6 : Log sédimentaire de la carotte GRE.5..... | 165 |
| Figure 8.7 : Log sédimentaire de la carotte SESC.2..... | 167 |
| Figure 8.8 : Log sédimentaire de la carotte STRO.1. | 169 |
| Figure 8.9 : Log sédimentaire de la carotte OND.1. | 171 |
| Figure 8.10 : MNT haute résolution (1 m) du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale | 173 |
| Figure 8.11 : Profils topographiques levés sur les sites PLUM, MAG et JUL..... | 174 |
| Figure 8.12 : TRE levée sur le site PLUM..... | 175 |
| Figure 8.13 : TRE levées sur les sites MAG et JUL..... | 176 |
| Figure 8.14 : Délimitation des sections mouillées à plein bord à partir des TRE levées sur les sites MAG et JUL..... | 178 |
| Figure 8.15 : Log sédimentaire de la carotte PLUM.1..... | 183 |
| Figure 8.16 : Log sédimentaire de la carotte MAG.1. | 185 |
| Figure 8.17 : Log sédimentaire de la carotte JUL.1. | 187 |
| Figure 8.18 : MNT haute résolution (1 m) du secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier | 189 |
| Figure 8.19 : Profils topographiques levés sur les sites CORD1 et CORD2. | 190 |
| Figure 8.20 : Profils topographiques levés sur les sites CORD3 et CORD4. | 191 |
| Figure 8.21 : TRE levées sur les sites CORD1 et CORD2..... | 192 |

| | |
|--|-----|
| Figure 8.22 : TRE levées sur les sites CORD3 et CORD4..... | 193 |
| Figure 8.23 : Délimitation des sections mouillées à plein bord à partir des TRE levées dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier. | 195 |
| Figure 8.24 : Log sédimentaire de la carotte CORD1.1. | 201 |
| Figure 8.25 : Log sédimentaire de la carotte CORD2.1. | 203 |
| Figure 8.26 : Log sédimentaire de la carotte CORD3.1. | 205 |
| Figure 8.27 : Log sédimentaire de la carotte CORD4.1. | 207 |
| Figure 9.1 : Histogramme des paléodébits à plein bord estimés le long de la Garonne toulousaine. | 211 |
| Figure 9.2 : Comparaison des sections mouillées à plein bord des chenaux du groupe 1 (débits à plein bord < 120 m ³ /s). | 212 |
| Figure 9.3 : Comparaison des sections mouillées à plein bord des chenaux du groupe 2 (débits à plein bord compris entre 250 et 300 m ³ /s). | 213 |
| Figure 9.4 : Comparaison des sections mouillées à plein bord des chenaux du groupe 3 (débits à plein bord compris entre 400 et 600 m ³ /s). | 214 |
| Figure 9.5 : Comparaison des sections mouillées à plein bord des chenaux du groupe 4 (débits à plein bord compris entre 900 et plus de 1100 m ³ /s) et du lit actuel de la Garonne au niveau de Grisolles. | 216 |
| Figure 9.6 : Correspondance entre âge et capacité hydraulique des chenaux. | 217 |
| Figure 9.7 : Délimitation des paléochenaux JUL et MAG à partir d'une photographie aérienne..... | 218 |
| Figure 9.8 : Systèmes à chenaux multiples du XIX ^e siècle dans les secteurs de Grenade/Ondes et Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier. | 219 |
| Figure 9.9 : Délimitation des paléochenaux CORD1 et CORD3 à partir d'une photographie aérienne..... | 219 |
| Figure 9.10 : Synthèse des logs sédimentaires..... | 220 |
| Figure 9.11 : Projection des valeurs granulométriques D0,5 et D0,99 sur l'image CM pour les échantillons prélevés dans les niveaux profonds. | 221 |
| Figure 9.12 : Modèle de recoupement du méandre de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier entre les années 1830 et la fin des années 1860..... | 222 |
| Figure 9.13 : Modèle de déconnexion des bras du système à chenaux multiples du secteur de Grenade/Ondes entre les années 1830 et les années 1860. | 222 |
| Figure 9.14 : Indices d'évolution des paléochenaux. | 223 |
| Figure 9.15 : Position des paléochenaux par rapport au lit actuel (altitude/distance). | 225 |
| Figure 10.1 : Principaux apports des approches géohistorique et stratigraphique. | 232 |
| Figure 10.2 : Relation entre données stratigraphiques issues des travaux de terrain menés sur une série de paléochenaux de la Garonne toulousaine et chronique climatique..... | 238 |
| Figure 11.2 : Facteurs de contrôle de l'évolution de la dynamique fluviale de la Garonne toulousaine au cours du XX ^e siècle.. | 240 |
| Figure 12.1 : Carte des principaux cours d'eau circum-alpins pour lesquels une tendance au tressage a été identifiée au cours du XIX ^e siècle..... | 244 |
| Figure 12.2 : Comparaison entre la Garonne Toulousaine et plusieurs cours d'eau européens | 246 |

Liste des tables

| | |
|---|-----|
| Table 1.1 : Relations empiriques entre les variations des variables de contrôle et les variations des variables de réponse (Schumm, 1977). | 18 |
| Table 1.2 : Exemples d'études sur le changement fluvial des cours d'eau européens publiées au cours des cinq dernières années. | 25 |
| Table 1.3 : Classification des actions en fonction du type de restauration et des mesures mises en oeuvre (Morandi et Piégay, 2011). | 32 |
| Table 2.1 : Synthèse des caractéristiques géomorphologiques de la Garonne toulousaine. | 44 |
| Table 2.2 : Synthèse des caractéristiques hydrologiques de la Garonne toulousaine. | 45 |
| Table 2.3 : Synthèse des processus observés. | 46 |
| Table 2.4 : Actions de gestion et restauration menées par la CATeZH Garonne et ses partenaires sur neuf sites le long de la Garonne toulousaine (CATeZH Garonne). | 50 |
| Table 3.1 : Synthèse des principaux travaux antérieurs sur la dynamique fluviale de la Garonne, reprenant la classification présentée dans le texte. | 54 |
| Table 3.2 : Synthèse des processus géomorphologiques observés avant la seconde moitié du XX ^e siècle. | 56 |
| Table 4.1 : Informations concernant le géoréférencement des cartes historiques. | 84 |
| Table 4.2 : Table de synthèse des mesures effectuées à l'échelle des tronçons (<i>BD tronçons</i>) et à l'échelle du linéaire (<i>BD linéaire</i>). | 89 |
| Table 4.3 : Synthèse des limites de l'utilisation des cartes anciennes en géomorphologie abordées par Gurnell et al. (2003). | 92 |
| Table 5.1 : Taux d'évolution des variables mesurées/calculées à l'échelle du linéaire | 97 |
| Table 8.1 : Données concernant les TRE du secteur de Grenade/Ondes. | 156 |
| Table 8.2 : Indices paléohydrauliques, stades de comblement et vitesses de remplissage calculés sur les paléochenaux du secteur de Grenade/Ondes. | 158 |
| Table 8.3 : Informations concernant les carottages réalisés dans le secteur de Grenade/Ondes. | 160 |
| Table 8.4 : Dates radiocarbones sur le site GRE. | 161 |
| Table 8.5 : Données concernant les TRE du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale. | 175 |
| Table 8.6 : Indices paléohydrauliques et stades de comblement calculés sur les paléochenaux du secteur de Verdun-sur-Garonne/Dieupentale. | 177 |
| Table 8.7 : Informations concernant les carottages réalisés dans le secteur de Verdun-sur-Garonne/ Dieupentale. | 179 |
| Table 8.8 : Dates radiocarbones sur les sites MAG et JUL. | 179 |
| Table 8.9 : Données concernant les TRE du secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier. | 191 |
| Table 8.10 : Indices paléohydrauliques, stades de comblement et vitesses de remplissage calculés sur les paléochenaux du secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier. | 194 |
| Table 8.11 : Informations concernant les carottages réalisés dans le secteur de Cordes-Tolosannes/Saint-Porquier. | 197 |
| Table 13.1 : Proposition de stratégie à adopter pour la réalisation d'une future campagne. | 255 |

Résumé : "Dynamique fluviale de la Garonne à l'Anthropocène"

Depuis la fin du XIX^e siècle / le début du XX^e siècle, les cours d'eau européens sont affectés par une incision et une contraction généralisées des chenaux, en réponse à l'intensification des activités anthropiques et à la transition climatique entre le Petit Âge Glaciaire (PAG) et le Réchauffement Global actuel (RG). Sur la Garonne, ce phénomène a été observé et décrit depuis les années 1960 dans la portion dite toulousaine (linéaire de 90 km entre les confluences de l'Ariège et du Tarn). Toutefois, peu d'études se sont intéressées à l'évolution de la dynamique fluviale à plus long terme. Cette thèse propose une reconstitution de la trajectoire d'évolution de la Garonne toulousaine sur une échelle de temps pluriséculaire. L'objectif est d'évaluer : 1) l'inscription de la tendance actuelle sur la période antérieure aux années 1950 ; 2) l'effet de la transition PAG/RG et des aménagements ponctuels de l'Epoque Moderne sur la dynamique fluviale ; 3) le mode de fonctionnement hydro-sédimentaire de la Garonne avant le XX^e siècle et 4) l'existence de tendances/disparités spatiales au sein du linéaire. La démarche méthodologique mise en oeuvre repose sur la complémentarité chronologique et spatiale des données traitées, issues de l'analyse des documents cartographiques historiques et de travaux de terrain menés sur 11 paléoformes fluviales. Les résultats révèlent : 1) une tendance au méandrage au cours de la phase terminale du PAG (seconde moitié du XIX^e siècle), marquée par des discontinuités le long du linéaire ; 2) une réduction de la dynamique fluviale amorcée dès la fin du XIX^e siècle / le début du XX^e siècle dans la partie amont/médiane du linéaire, en réponse à des facteurs de contrôle multiples et 3) une réduction de la dynamique fluviale plus tardive dans la partie aval, sous l'effet d'une campagne de protection des berges. Par ailleurs, cette étude fournit des données sur la période correspondant à l'Optimum Climatique Médiéval (OM, 900-1300) et révèle une faiblesse documentaire concernant le PAG avant le XIX^e siècle.

Mots clés : *Garonne, dynamique fluviale, trajectoire d'évolution, Anthropocène, Petit Âge Glaciaire, approche multi-sources*

Abstract: "Fluvial dynamics of the Garonne River during the Anthropocene"

Since the end of the nineteenth century, significant morphological channel changes have been observed along European rivers. The major processes involved, channel incision and narrowing, appear as the result of increasing human activities and the transition from the Little Ice Age (LIA) to Global Warming (GW). On the Garonne River (southwestern France), this phenomenon has been observed and described since the 1960th between the Ariège and Tarn tributaries (The Toulouse Garonne, 90 km). However, very few studies have focused on a longer evolutionary period. In this study, we propose to analyze the evolutionary trajectory of the Toulouse Garonne on a plurisecular timescale. The aim of this study is to assess: 1) the evolutionary tendency before the 1950th; 2) the impact of the LIA to GW transition and former human disturbances on fluvial dynamics; 3) the hydro-sedimentary pattern of the Garonne River before twentieth century; and 4) the presence of spatial discontinuities within the reach. The analysis is based on two types of data, which are complementary in terms of chronology and spatial cover: historical maps and field data collected on 11 palaeochannels. The results show: 1) a meandering channel in the late LIA (second half of the nineteenth century), with spatial discontinuities along the Toulouse Garonne; 2) a morphological adjustment since the late nineteenth / early twentieth centuries in the upstream and middle reach, in response to several controls and; 3) a later adjustment in the downstream reach, in response to bank protection. Furthermore, this study provides new data on morphological channel features over the Medieval Climatic Optimum (MCO, 900-1300) and reveals that only a very few data allows to assess the channel behavior over the LIA.

Keywords: *Garonne River, fluvial dynamics, evolutionary trajectory, Anthropocene, Little Ice Age, Multi sources*